

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

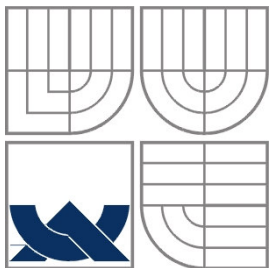
## TOLERANČNÍ ANALÝZA FILTRŮ S CDTA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

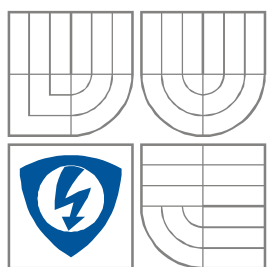
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

JAN MIKSL

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A  
KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## Toleranční analýza filtrů s CDTA

The Tolerance Analysis of Filters with CDTA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

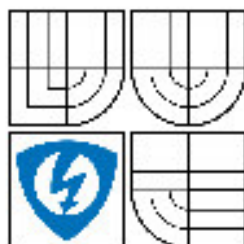
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Jan Miksl

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. Roman Šotner

BRNO, 2009



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Elektronika a sdělovací technika

**Student:** Jan Miksl

**ID:** 98274

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2008/2009

## NÁZEV TÉMATU:

**Toleranční analýza filtrů s CDTA**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s prvkem CDTA (Current Differencing Transconductance Amplifier) pracujícím v proudovém režimu. Na již publikované struktuře universálního filtru druhého řádu s prvky CDTA proveďte toleranční a citlivostní analýzu s využitím simulačních programů.

Obvod modifikujte tak, aby měl co nejlepší vlastnosti pro typické tolerance použitých prvků. Modifikovaný filtr může být libovolného řádu. Pro tento obvod proveďte toleranční a citlivostní analýzu a výsledky porovnejte.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] NETHERLANDS, S.: CDTA based universal transadmittance filter, SpringerLink, 2007, ISSN: 0925-1030.

[2] BIOLEK, D. Řešíme elektronické obvody aneb kniha o jejich analýze. Praha: BEN - technická literatura, 2007, ISBN: 80-7300-125-X.

[3] VLACH, J., SINGHAL, K. Computer Methods for Circuit Analysis and Design. New York: Van Nostrand Reinhold, 2001.

**Termín zadání:** 9.2.2009

**Termín odevzdání:** 5.6.2009

**Vedoucí práce:** Ing. Roman Šotner

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida  
Předseda oborové rady

# LICENČNÍ SMLOUVA

## POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

### 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Jan Miksl  
Bytem: Žarošice 50, 696 34  
Narozen/a (datum a místo): 28. listopadu 1986 v Ostravě

(dále jen „autor“)

a

### 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika  
(dále jen „nabyvatel“)

## Čl. 1

### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☐ diplomová práce
- ☒ bakalářská práce
- ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....  
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Toleranční analýza filtrů s CDTA

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Roman Šotner

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: \_\_\_\_\_

VŠKP odevzdal autor nabyvateli\*:

- ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

---

\* hodící se zaškrtněte

## Článek 2

### Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
  - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
  - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
  - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
  - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## Článek 3

### Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 5. června 2009

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

# Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na toleranční a citlivostní analýzu filtrů s prvky CDTA. První část práce je věnována teorii a základním vlastnostem filtrů. Poté se práce zabývá aktivními prvky v proudovém módu, které jsou využity k realizaci modelu CDTA. Je nadefinován prvek CDTA, jeho bloková struktura, schématická značka a popis jeho přenosových vlastností. Následuje simulace, ve které je analyzována struktura KHN filtru s OZ. Výsledky této simulace slouží k porovnání s výsledky simulací filtru s prvky CDTA. Je analyzován filtr s jeho ideálním modelem, modelem 3. úrovně a model reprezentovaný dílčími makromodely (AD 844, MAX 435) výrobců dostupnými komerčně. Poté jsou vysvětleny pojmy toleranční a citlivostní analýza a vypočteny teoretické hodnoty citlivostí pro jednotlivé prvky v daném zapojení. Další část se zabývá způsoby modifikace a návrhu struktury KHN s prvky CDTA modely 3. úrovně (ladění mezního kmitočtu transkonduktancí, změna činitele jakosti a návrh zapojení podle Butterworthovy aproximace). V poslední kapitole je zapojení optimalizováno pomocí programu PSpice a pozornost je zaměřena na dosažení co možná nejlepších vlastností zapojení pro typické tolerance použitých prvků. V závěru jsou zhodnoceny výsledky simulací, porovnány vlastnosti zapojení před a po optimalizaci a uvedeny výhody a nevýhody filtru s prvky CDTA.

## Klíčová slova

Aktivní prvek, proudový mód, transkonduktance, struktura KHN, CDTA, citlivostní analýza, toleranční analýza, optimalizace, histogram

# **Abstract**

The bachelor thesis deals with the concept, design, modeling, tolerance and sensitivity analysis of the KHN filter using CDTA. The first part contains theoretical introduction about filters and their general properties. Secondly, the CDTA element, its block structure, schematic symbol as well as its circuit features are defined. Standard KHN filter structure with operational amplifiers is simulated. Results of this simulation are used for comparison with simulations results of CDTA KHN filter structure. The multifunctional CDTA KHN filter structure is simulated using ideal CDTA models, third-level models and models based on professional macromodels of attainable components (AD 844, MAX 435). Then tolerance and sensitivity analyses are explained and described. The following section discusses ways of modifying the structure and design KHN structure with CDTA models 3rd level. In the last chapter the circuit is optimized using PSpice and the attention is focused on achieving the best possible involvement of the typical characteristics of the elements of tolerance. In conclusion, the results of simulations are evaluated, compared the characteristics of circuit before and after optimization, and mention the advantages and disadvantages of filter elements with CDTA.

## **Keywords**

Active element, current mode, transconductance, KHN structure, CDTA, sensitivity analysis, tolerance analysis, optimization, histogram

**Miksl, J.** *Toleranční analýza filtrů s CDTA*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2009. 51 s., 2 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: ing. Ronam Šotner.



# Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Toleranční analýza filtrů s CDTA jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 5. června 2009

.....  
podpis autora

# Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Romanu Šotnerovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 5. června 2009

.....  
podpis autora

# Obsah

Úvod.....	- 11 -
1. Kmitočtové filtry .....	- 12 -
2. Aktivní prvky.....	- 12 -
2.1. Úvod .....	- 12 -
2.2. Napěťový mód .....	- 12 -
2.3. Proudový mód.....	- 13 -
2.4. Proudové konvejory .....	- 13 -
2.5. CDBA.....	- 13 -
2.6. OTA .....	- 14 -
3. Prvek CDTA .....	- 15 -
3.1. Úvod CDTA.....	- 15 -
3.2. Model CDTA .....	- 15 -
3.3. Stavební bloky s CDTA.....	- 16 -
3.4. Možná realizace CDTA.....	- 16 -
4. Analýza filtrů KHN .....	- 18 -
4.1. Úvod .....	- 18 -
4.2. KHN s OZ .....	- 18 -
4.3. KHN s ideálním CDTA .....	- 21 -
4.4. KHN s CDTA modelem třetí úrovně .....	- 23 -
4.5. KHN s CDTA realizovanými makromodely .....	- 26 -
5. Použité analýzy .....	- 28 -
5.1. Toleranční analýza Monte-Carlo .....	- 28 -
5.2. Citlivostní analýza .....	- 28 -
5.3. Ukázka výpočtu citlivostí.....	- 29 -
6. Možnosti návrhu a modifikace KHN filtru s prvky CDTA modely 3. úr.....	- 32 -
6.1. Ladění mezního kmitočtu změnou transkonduktance .....	- 32 -
6.2. Sledování činitele jakosti.....	- 32 -
6.3. Návrh KHN filtru s prvky CDTA podle Butterworthovy aproximace ..	- 36 -
7. Optimalizace .....	- 39 -
7.1. Úvod .....	- 39 -
7.2. Optimalizace KHN filtru s CDTA modely 3. úrovně .....	- 39 -
7.3. Optimalizace CDTA s makromodely .....	- 42 -
7.4. Optimalizace $f_c$ , $Q$ , $K_0$ pásmové propusti filtru KHN s CDTA .....	- 43 -
7.5. Optimalizace $f_c$ , $Q$ , $K_0$ DP, PP, HP filtru KHN s CDTA.....	- 44 -
7.6. Srovnání dosažených výsledků .....	- 45 -
8. Závěr .....	- 47 -
9. Seznam literatury .....	- 48 -
Vybrané nejpoužívanější zkratky a symboly.....	- 49 -
Přílohy .....	- 50 -
Histogramy analýz hromadné výroby.....	- 50 -

# Úvod

Bakalářská práce se zabývá analýzou aktivních filtrů, které jsou tvořeny rezistory, kondenzátory a aktivními prvky CDTA (current differencing transconductance amplifier). Cílem této práce je seznámení s prvkem CDTA - vytvořit model součástky CDTA, analyzovat univerzální filtr typu KHN (Kerwin-Huelsman-Newcomb) s prvky CDTA, provést citlivostní a toleranční analýzu tohoto zapojení v programu PSpice a porovnat se simulacemi filtru KHN realizovanými klasickými operačními zesilovači (OZ). Následující část je věnována optimalizaci zapojení filtru typu KHN s prvky CDTA a snahy o dosažení co nejlepších vlastností pro typické tolerance použitých prvků.

V posledních letech vlivem modernizace rostou požadavky na zpracování signálu, rychlosti přenosu a také rostou požadavky na pracovní pásmo kmitočtů, na kterém jsou signály zpracovávány. Proto vznikají a jsou navrhovány nové aktivní prvky v napěťovém i proudovém módu jako operační zesilovače, operační transkonduktanční zesilovače, proudové konvejory, proudové zesilovače, apod. Běžné prvky (operační zesilovače) v napěťovém módu (VM) pracují na vstupu i výstupu s hodnotou napětí se potýkají s problémy při využití na vyšší kmitočtová pásma (parazitní vlastnosti, stabilita, atd.). Při zkoumání proudového módu (CM) bylo ale zjištěno, že prvky v tomto módu dosahují mnohem lepších výsledků. To je zapříčiněno tím, že uzly obvodu jsou na celkem nízké odporové úrovni a odpovídající časové konstanty (při stejných parazitních kapacitách) jsou kratší než v napěťovém módu a díky tomu mohou obvody v proudovém módu pracovat na vyšších kmitočtech. Staly se tak vhodným řešením v mnoha odvětvích techniky směřující svými požadavky k vyšším kmitočtům (pásmo videa a více).

V [4] byl uveden a koncipován nový aktivní prvek CDTA pracující v proudovém režimu a využívající diferenci proudů na vstupu. Prvek CDTA byl popsán a simulován na základě teoretických předpokladů a doposud ještě nebyl zařazen do hromadné výroby. V případě, že se tak stane, najde široké uplatnění např. filtry, analogové násobičky, oscilátory a jiné.

# 1. Kmitočtové filtry

Kmitočtové filtry nacházejí uplatnění snad ve všech odvětvích elektrotechniky. Slouží k odstranění určitého spektra signálu a přenesení ostatních složek bez útlumu. Nejjednodušší realizace filtrů je pomocí pasivních součástek R, L a C (rezistorů, cívek a kondenzátorů). S jejich pomocí lze sestavit různé typy obvodů RC, LC, RLC, které upravují kmitočtové a fázové přenosové charakteristiky. Jejich předností je rychlá a jednoduchá konstrukce, která nevyžaduje napájení. Dalším typem filtrů jsou filtry aktivní, které se skládají z R, L, C součástek a specifikovaných aktivních bloků (tranzistorů, operačních zesilovačů atd.). Zapojení aktivních filtrů je složitější, je nutné je napájet a dochází problémům s parazitními vlastnostmi aktivních prvků (omezený kmitočtový rozsah, stabilita, dynamika, linearita apod.). Podrobnější dělení filtrů podle přenosových funkcí, aproximací, koncepcí, struktur a další informace lze najít např. v [8], [9].

## 2. Aktivní prvky

### 2.1. Úvod

Aktivní prvky [2] jsou v současnosti velice rozšířeny a používají se ve většině elektrických zařízeních. Vlivem modernizace se zvyšují požadavky nejen na vlastnosti, ale také i na rozměry těchto součástek. Pro aktivní prvky je určujících několik parametrů, jako je odstup signálu od šumu (S/N), tranzitní kmitočet, šířka přenášeného pásma, dynamika, linearita, napájecí napětí a tedy i spotřeba. Jsou dva typy pracovních režimů: napěťový a proudový mód. Případně se můžeme setkat s režimem hybridním, kdy prvky pracují na vstupu s hodnotami proudu, na výstupu s napětím nebo naopak. Podobný pohled je na obvody či funkční celky (např. filtry) pracující na vstupu a výstupu s napětími a ve specifické části pracují dílčí podobvody či aktivní bloky s proudy (nebo naopak). Každý z těchto režimů má své výhody a nevýhody, které jsou zmíněny dále. Aktivních prvků je celá řada, práce však zmiňuje pouze ty, které jsou zde využity.

### 2.2. Napěťový mód

Prvky v napěťovém módu pracují na vstupu a výstupu s hodnotami napětí. V uzlech obvodu je vysoká impedance, a musíme tedy počítat s parazitní kapacitou, která s rostoucí odporovou úrovní uzlů způsobuje prodlužování časových konstant. V současné době umí pracovat prvky v napěťovém módu i na vyšších kmitočtech, zejména problematická je na nestabilita při jednotkovém zesílení.

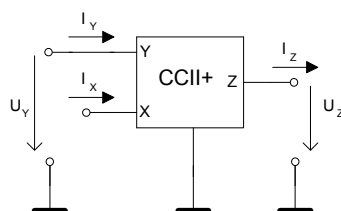
## 2.3. Proudový mód

Prvky v proudovém módu [1] pracují na vstupu i výstupu s proudovou odezvou. Bylo zjištěno, že prvky v proudovém módu mohou pracovat na mnohem vyšších kmitočtech než prvky v napěťovém režimu s klasickými operačními zesilovači. Proudový režim se vyznačuje nízkou úrovní uzlů v obvodu a tím i menšími časovými konstantami při stejných parazitních kapacitách. Další výhodou je větší odstup signálu od šumu a větší šířka pracovního pásma oproti režimu napěťovému. Díky těmto vlastnostem se proudový mód stal atraktivním řešením pro mnohé zapojení v elektrotechnice a umožňuje jednoduchou realizaci např. matematických operací, jako je proudové sčítání, odčítání (je třeba pouhý uzel). Jednou z nevýhod proudového módu je to, že se zatím nedá použít přímo. Většina zařízení totiž pracuje s napětími. To však lze obejít tím, že před měřený obvod zařadíme na vstup převodníky napětí/proud a na výstup naopak.

## 2.4. Proudové konvejory

Proudové konvejory [2], [8], [9] jsou moderní funkční mnohohrany s různě definovanými přenosy mezi branami pro proud a napětí. V minulosti vzniklo několik generací. Využití nacházejí na vyšších kmitočtech v proudovém módu, kde mají lepší kmitočtové vlastnosti než klasické OZ. Funkce konveju je sledovat napětí a proud (konvejování = sledování). V této práci je využíván tříbranový proudový konveju druhé generace (CCII+) (obr. 1), který má dvě brány vstupní X, Y a jednu výstupní Z. Brána X je proudový vstup s nízkou impedancí, Y je napěťový vysokoimpedanční vstup a Z je proudový výstup. Závislost mezi branami lze popsat vztahy

$$I_X = I_Z, \quad I_Y = 0, \quad U_X = U_Y. \quad (1), (2), (3)$$

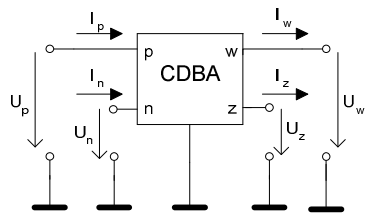


Obr. 1. Konveju druhé generace CCII+.

## 2.5. CDBA

Prvek CDBA (Current Differencing Buffered Amplifier) [3] je proudový operační zesilovač měnící tok proudu na dvojici vstupu o nízké impedanci na rozdíl proudu, který teče z tak zvaného z terminálu do vnější zátěže Z. Napětí na z terminálu je pak kopírováno napěťovým sledovačem k nízkimpedančnímu terminálu w se ziskem 1. Prvek je popsán následujícími vztahy

$$U_P = U_N = 0, \quad I_Z = I_P - I_N, \quad U_w = U_Z. \quad (4), (5), (6)$$



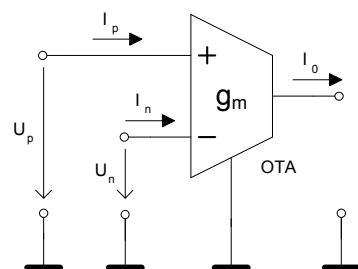
Obr. 2. Symbol prvku CDBA.

## 2.6. OTA

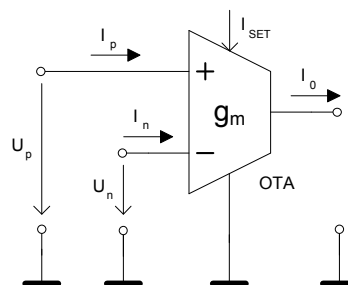
OTA (Operational Transconductance Amplifier) [2], [8], [9] je perspektivní aktivní blok, jehož přenosová vodivost (transkonduktance) je konstanta, či proměnná (pokud je možno OTA řídit) mezi vstupním napětím a výstupním proudem. Lze efektivně využít pro návrh obvodů v napěťovém, proudovém i smíšeném módu. Závislost mezi vstupním napětím a výstupním proudem lze vyjádřit vztahem

$$I_0 = g_m (U_p - U_n), \quad (7)$$

kde  $U_p$  a  $U_n$  jsou napětí na vstupu OTA vztažené proti zemi. Transkonduktance  $g_m$  u OTA lze nastavit na konstantní hodnotu, nebo ji lze měnit řídicím proudem  $I_{SET}$  (obr. 3, 4). Vstupní a výstupní impedance zesilovače jsou teoreticky nekonečné. V práci je využit prvek OTA s více výstupy, nebo-li BOTA (Balanced Output OTA), který má dva proudové výstupy, a také MOTA (Multiple Output OTA) s vícenásobnými proudovými výstupy.



Obr. 3. OTA s konstantní transkonduktancí.



Obr. 4. OTA s nastavitelnou transkonduktancí.

## 3. Prvek CDTA

### 3.1. Úvod CDTA

Prvek CDTA (Current Differencing Transconductance Amplifier) [4] je aktivní prvek pracující v proudovém módu. Je charakterizován proudovými vstupy a výstupy. Prvek CDTA vznikl z prvku CDBA, kde výstupní napěťový sledovač v CDBA byl nahrazen transkonduktančním operačním zesilovačem (OTA), a tak vznikl prvek pracující v proudovém módu (s proudovými vstupy i výstupem).

### 3.2. Model CDTA

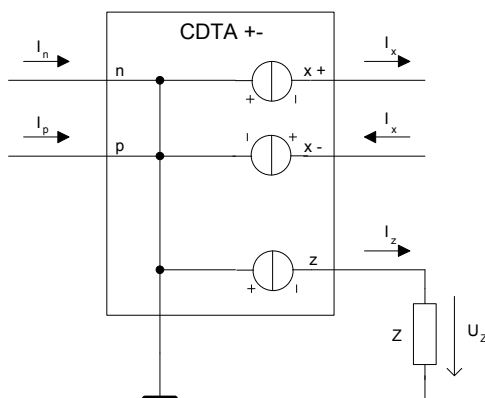
K popisu vlastností CDTA je použit jeho behaviorální model a schematickou značku (obr. 5, 6) se dvěma proudovými vstupy a výstupy. Model [4], [7] může být však rozšířen o další výstupy tím, že namísto OTA bude použit MOTA (Multiple Output OTA). Model CDTA má diferenční nízkoimpedanční proudové vstupy  $p$ ,  $n$ . Rozdíl vstupních proudů

$$\Delta I = I_z = I_p - I_n, \quad (8)$$

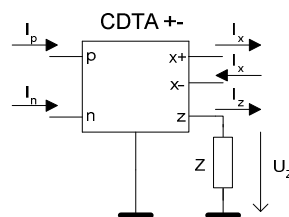
teče z  $z$  terminálu do vnější zátěže  $Z$ . Napětí  $U_z$  na  $z$  terminálu je převedeno transkonduktancí  $g_m$  na proud

$$I_x = \pm g_m U_z, \quad (9)$$

který párově vytéká výstupními terminály  $x$ . Transkonduktanci CDTA lze řídit také elektronicky přes pomocný port, který však není zobrazen.



Obr. 5. Behaviorální model CDTA.



Obr. 6. Schematická značka CDTA.

Proud tekoucí ze svorek  $x$  může mít trojí kombinaci. Může z obou svorek  $x$  vytékat, nebo vtékat, či z jedné svorky vytékat a do druhé vtékat. To lze ovlivnit přenosovou vodivostí. Vzhledem k této vlastnosti CDTA vzniklo adekvátní značení (CDTA++, CDTA+, CDTA--). Plus pro proud vytékající z  $x$  terminálu a mínus naopak.

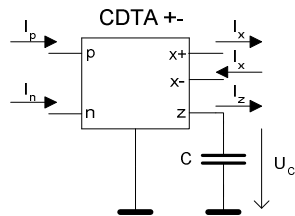
### 3.3. Stavební bloky s CDTA

S prvky CDTA je možno realizovat nejrůznější zapojení [7] se specifickými funkcemi, jako je proudový integrátor, derivátor, zesilovač či sledovač. Vše pouhou záměnou prvku  $Z$  (obr. 6) za  $R$ ,  $L$  nebo  $C$ . Obecně pro výstupní proud  $I_x$  platí

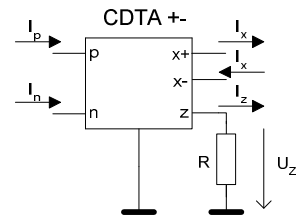
$$I_x = \pm g_m Z (I_p - I_n). \quad (10)$$

Proudový integrátor vznikne připojením uzemněného kondenzátoru k z portu prvku CDTA (obr. 7). Integrátor má několikanásobné výstupy a mohou být invertující nebo neinvertující. V tomto zapojení je také možné sčítat nebo odečítat proudy přímo na vstupu prvku CDTA

$$I_x = \pm \frac{1}{s} \frac{g_m}{C} (I_p - I_n). \quad (11)$$



Obr. 7. CDTA proudový integrátor.



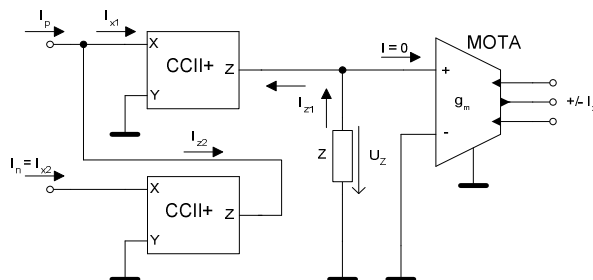
Obr. 8. CDTA proudový zesilovač.

Pokud je k prvku CDTA na port z připojen uzemněný rezistor, tak vznikne rozdílový proudový zesilovač na obr. 8. Záleží však na tom, jaká hodnota rezistoru je na portu z zvolena. Pokud  $R_z = g^{-1}$ , tak se jedná o sledovač rozdílu vstupních proudů. V případě, že  $R_z \neq g^{-1}$ , obvod se bude chovat jako proudový zesilovač či zeslabovač zesilující rozíl vstupních proudů. Výstupní proudy jsou dány jako

$$I_x = \pm R g_m (I_p - I_n). \quad (12)$$

### 3.4. Možná realizace CDTA

Prvek CDTA je v podstatě prvek CDBA s malou úpravou na pozici napěťového sledovače na výstupu. Pro představu je uvedeno ještě jedno schematické zapojení [4] prvku CDTA na obr. 9.



Obr. 9. Schematické zapojení CDTA s proudovými konvejory a OTA.



Schéma obsahuje dva proudové konvejory, které slouží jako sledovače proudu. V druhé části zapojení je MOTA s proudovými výstupy. Pro vyjádření proudu  $I_x$  na výstupu je definováno několik vztahů, které v obvodovém schématu platí

$$I_p = I_{x1} = I_{z1}, \quad I_n = I_{x2} = I_{z2}, \quad (13)$$

$$I_{x1} = I_p - I_{z2} = I_p - I_{x2} = I_p - I_n, \quad (14)$$

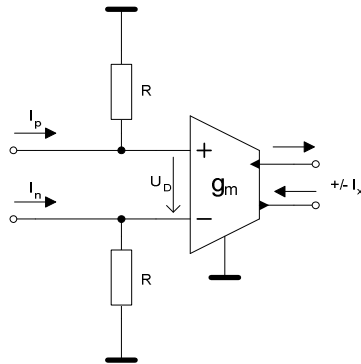
$$U_z = Z \cdot I_{z1}, \quad (15)$$

$$I_x = g_m(-U_z), \quad (16)$$

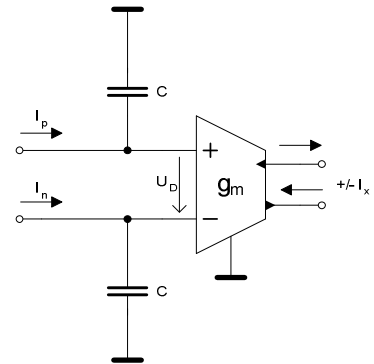
$$I_x = -g_m Z \cdot I_{z1}, \quad (17)$$

$$I_x = -g_m Z \cdot (I_p - I_n). \quad (18)$$

Jiná možnost jednodušší obvodové náhrady CDTA s názvem proudová diferenční jednotka [5] (CDU - current differencing unit) je na obr. 10, 11. Obvod se zjednodušil (ušetří se oba CCII+ vstupní sekce), ale znamená to vždy pasivní prvek navíc.



**Obr. 10.** Ekvivalentní zapojení k CDTA, zesilovač proudu [5].



**Obr. 11.** Ekvivalentní zapojení k CDTA, integrátor proudu.

Pro zesilovač proudu na obr. 10 platí vztah

$$I_x = \pm U_D g_m = \pm (I_p R - I_n R) \cdot g_m = \pm (I_p - I_n) R \cdot g_m, \quad (19)$$

a pro integrátor na obr. 11 vztah

$$I_x = \pm U_D g_m = \pm g_m \left( \frac{1}{sC} \right) \cdot (I_p - I_n). \quad (20)$$

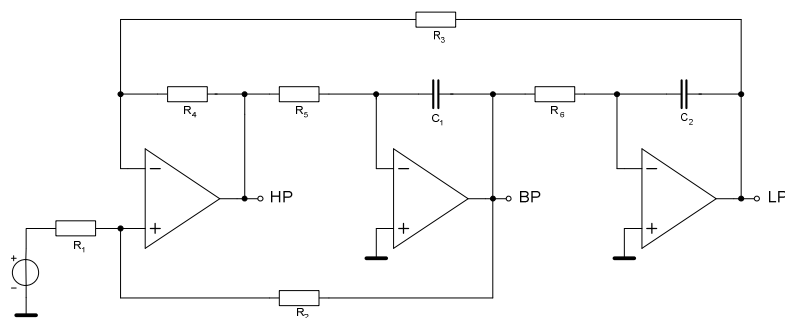
## 4. Analýza filtrů KHN

### 4.1. Úvod

Filtry lze realizovat různými způsoby. V práci je porovnávána struktura typu KHN (Kerwin-Huelsman-Newcomb) filtru realizována s OZ (pro porovnávací účely), s ideálními prvky CDTA, s modely CDTA 3. úrovně a s modely CDTA sestavených z makromodelů dostupných prvků AD 844 [10] a MAX 435 [11]. V průběhu práce jsou uváděny citlivostní a toleranční analýzy jednotlivých zapojení. Všechna zapojení jsou navrhována na charakteristický kmitočet  $f_c = 1$  MHz a s činitelem jakosti  $Q = 1$ .

### 4.2. KHN s OZ

Zapojení KHN filtru [6] na obr. 12 disponuje několika přenosy a to DP, PP, HP, po případné úpravě (přidání sumace DP a HP) i PZ.



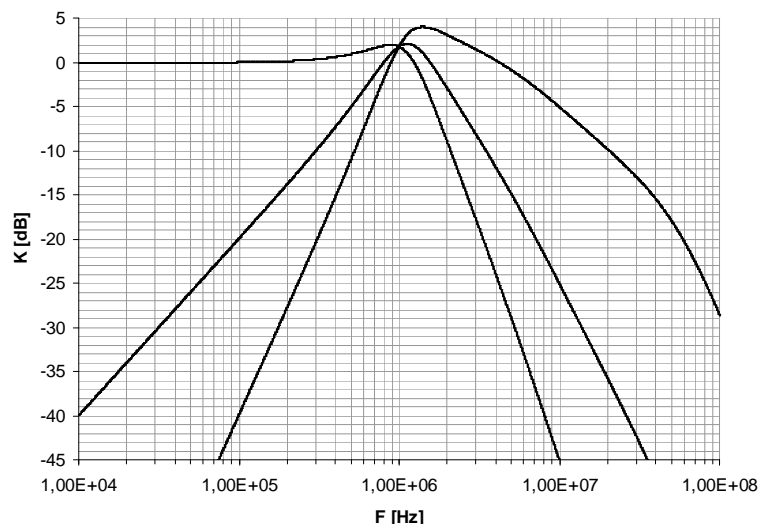
Obr. 12. Zapojení KHN filtru.

Je velmi známo [6], [8], [9], že pro tento typ filtru platí

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (21)$$

Hodnoty kapacit jsou zvoleny 1 nF a z nich vypočítány hodnoty odporů  $R_5$  a  $R_6$  pro mezní kmitočet  $f_c = 1$  MHz. Tento způsob je volen proto, že v praxi je snadnější vyrobit přesný odpor jak kapacitu. Když je uváženo  $R = R_5 = R_6$

a  $C = C_1 = C_2$ , potom  $R = \frac{1}{2\pi \cdot 1 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 10^{-9}} = 160 \text{ } \Omega$ . Hodnoty ostatních rezistorů (součtově rozdílového zesilovače) jsou voleny 10 k $\Omega$ . Následuje simulace zapojení v programu PSpice na obr. 13.



**Obr. 13.** Frekvenční odezva KHN filtru s OZ.

Nejedná se o ideální KHN, protože za namísto ideálního OZ je použito dostupná reálná součástka, konkrétně OPA603X/BB [12], která má lepší vlastnosti na vyšších kmitočtech než zbylé OZ v knihovně programu PSpice. Teoreticky zvolený mezní kmitočet byl stanoven na  $f_c = 1$  MHz, simulace určila mezní kmitočet  $f_c = 1,12$  MHz. Rozdíl měřené hodnoty od teoretické je  $\Delta f = 112$  kHz. Jako součást počítačových analýz KHN filtru je provedena pro představu i citlivostní analýza ukazující na obr. 14, které součástky se nejvíce podílejí na změně mezního kmitočtu. Hodnoty tolerancí byly u všech součástek nastaveny na 1%.

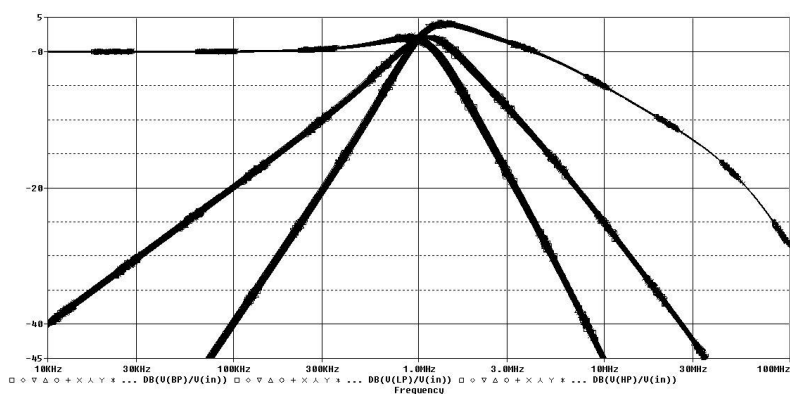
Parameters						
Component	Parameter	Original	@Min	@Max	Rel Sensitivity	Linear
C1	VALUE	1n	1.0100n	990p	-7.5683k	67
R5	VALUE	160	161.600k	158.400k	-7.5262k	66
R4	VALUE	10k	9.9000k	10.1000k	-7.1570k	62
R3	VALUE	10k	10.1000k	9.9000k	-6.2101k	71
R6	VALUE	160	161.600k	158.400k	-5.3220k	61
C2	VALUE	1n	1.0100n	990p	-5.3096k	61
R1	VALUE	10k	9.9000k	10.1000k	-1.1798k	13
R2	VALUE	10k	10.1000k	9.9000k	-1.0913k	12

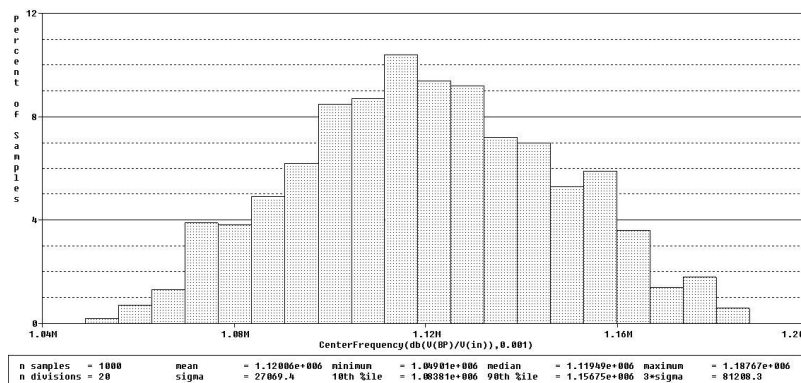
Specifications						
On/Off	Profile	Measurement	Original	Min	Max	
<input checked="" type="checkbox"/>	cdta_khn.sim	CenterFrequency(db(V(BP)/V(in)),0.001)	1.1199meg	1.0798meg	1.1621meg	

**Obr. 14.** Citlivostní analýza KHN filtru.

Při toleranční analýze (obr. 15) je zvolena tolerance součástek následovně. Pro  $R$  1% a pro  $C$  5%.



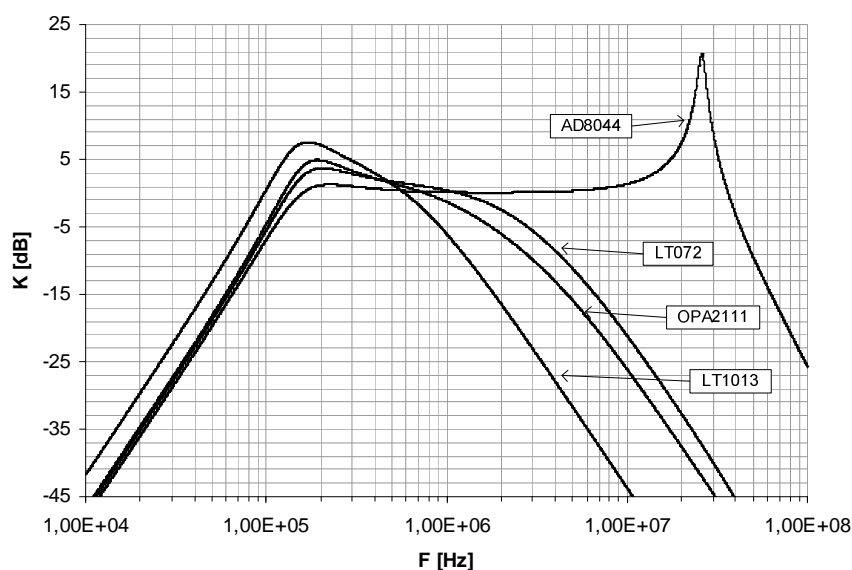
**Obr. 15.** Toleranční analýza KHN filtru s OZ (pro 300 běhů).



**Obr. 16.** Histogram KHN filtru s OZ.

Z histogramu (obr. 16) lze vyčíst, že většina vyrobených prvků bude mít mezní kmitočet  $f_c = 1,12$  MHz. Nejhorší případy z vyrobených pak  $f_{min} = 1,05$  MHz a  $f_{max} = 1,19$  MHz. Rozptyl je 27 kHz.

Pro demonstraci, že OZ v napěťovém módu se nehodí uplatňovat na vysokých kmitočtech, je vybráno několik OZ z knihovny PSpice a provedena simulace (obr. 17.). Obvod byl navržen na mezní kmitočet  $f_c = 160$  KHz. Pro jednotlivé OZ (TL072 [13], LT1013 [14], AD8044 [15], OPA2111 [16]) jsou vykresleny průběhy horní propusti a zkoumána funkčnost a stabilita filtru.



**Obr. 17.** Sledování průběhů HP KHN s OZ na mezním kmitočtu 160 kHz.

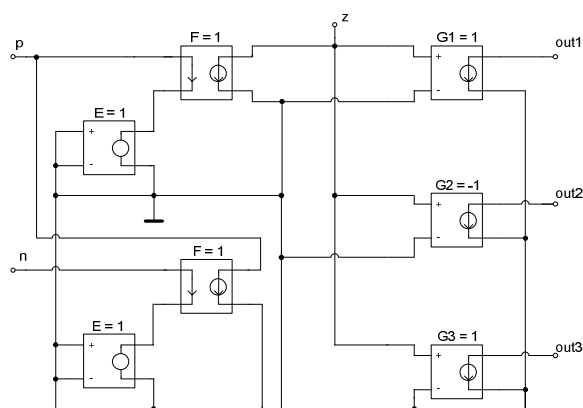
V obr. 17 lze vidět, že OZ nejsou schopny pracovat na vyšších kmitočtech. HP přestává s rostoucím kmitočtem plnit svou funkci a nebo např. u AD8044 se obvod pravděpodobně stane nestabilním. Možné řešení spočívá v použití rychlejších a stabilnějších OZ a nebo v náhradě OZ za prvky pracující v proudovém módu.

### 4.3. KHN s ideálním CDTA

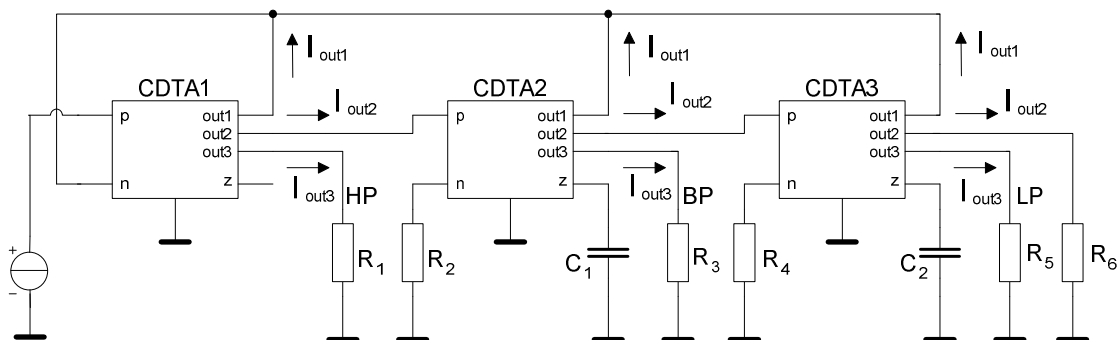
K představení správné funkce filtru s prvky CDTA byl vytvořen ideální model prvku CDTA. Ideální model se vyznačuje tím, že neobsahuje žádné setrvačné prvky. Schéma zapojení je uvedeno na obr. 18 a modifikováno z [7]. Poté byl prvek zapojen do struktury KHN obr. 19 a odsimulován. Hodnoty jednotlivých součástek jsou uvedeny v tabulkách (tab. 1, 2).

$R_1 [\Omega]$	1k	$R_6 [\Omega]$	1k
$R_2 [\Omega]$	1k	$C_1 [F]$	1n
$R_3 [\Omega]$	1k	$C_2 [F]$	1n
$R_4 [\Omega]$	1k		

**Tab. 1.** Hodnoty součástek v programu PSpice při simulaci ideálního CDTA.



**Obr. 18.** Model ideálního prvku CDTA v programu Pspice.



**Obr. 19.** Schéma zapojení struktury filtru KHN s prvky CDTA v programu PSpice.

Pro výpočet mezního kmitočtu jsou převzaty a modifikovány vzorce z [7]. Ze jmenovatele přenosové funkce filtru

$$D(s) = s^2 + s \frac{g_2}{C_1} + \frac{g_2 g_3}{C_1 C_2} = s^2 + s \frac{\omega}{Q} + \omega^2, \quad (22)$$

byl získán vzorec pro výpočet transkonduktance (29).

Pro DP, PP a HP platí následující přenosové funkce

$$K_{DP}(s) = \frac{\frac{g_2 g_3}{C_1 C_2}}{s^2 + s \frac{g_2}{C_1} + \frac{g_2 g_3}{C_1 C_2}}, \quad (23)$$

$$K_{PP}(s) = \frac{s \frac{g_2}{C_1}}{s^2 + s \frac{g_2}{C_1} + \frac{g_2 g_3}{C_1 C_2}}, \quad (24)$$

$$K_{HP}(s) = \frac{s^2}{s^2 + s \frac{g_2}{C_1} + \frac{g_2 g_3}{C_1 C_2}}. \quad (25)$$

Ze vzorce

$$\omega_c = \sqrt{\frac{g_2 g_3}{C_1 C_2}}, \quad (26)$$

lze získat vzorce pro výpočet mezního kmitočtu a jakosti obvodu

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g_2 g_3}{C_1 C_2}}, \quad (27)$$

$$Q = \sqrt{\frac{C_1 g_3}{C_2 g_2}}. \quad (28)$$

Pokud jsou zvoleny, obdobně jako v části KHN, hodnoty kapacit  $C = C_1 = C_2 = 1 \text{ nF}$ ,  $f_c = 1 \text{ MHz}$  a platí  $g_2 = g_3 = g$ , tak je možno vypočítat hodnoty transkonduktancí v obr. 19 (transkonduktanci prvního bloku CDTA volím 1 mS) podle

$$g = g_2 = g_3 = 2\pi f_c \cdot C = 2\pi \cdot 1 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^{-9} = 6,3 \text{ mS}. \quad (29)$$

Hodnoty vodivosti  $g_m$  v ideálním prvku CDTA jsou nastaveny následovně (tab. 2).

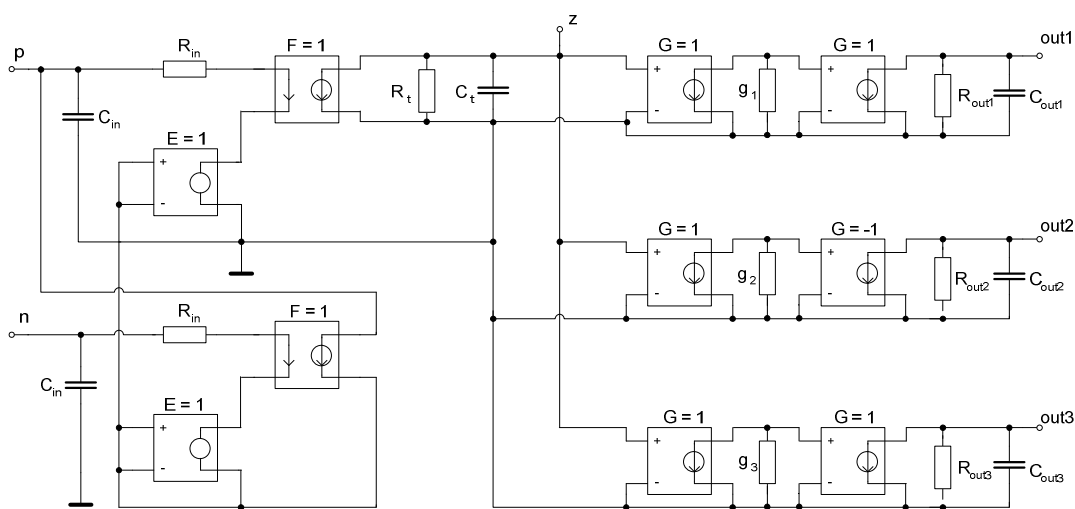
<b>blok</b>	<b><math>g_m</math></b>
<b>CDTA<sub>1</sub></b>	1e-3
<b>CDTA<sub>2</sub></b>	6,3e-3
<b>CDTA<sub>3</sub></b>	6,3e-3

**Tab. 2.** Hodnoty vodivostí prvků CDTA.

Mezní kmitočet je podle teoretických předpokladů nastaven na  $f_c = 1$  MHz a  $Q = 1$ . Simulací s ideálními bloky je  $f_c$  určen samozřejmě velmi přesně. Rozdíl mezi navrženou a zjištěnou hodnotou je 60 Hz.

#### 4.4. KHN s CDTA modelem třetí úrovně

K uskutečnění simulace filtru KHN s modelem CDTA třetí úrovně bylo potřeba nejdříve vytvořit model prvku v programu PSpice (obr. 21). Struktura KHN filtru, ve které byl CDTA odsimulován, je stejná jako u ideálního CDTA na obr. 19. Hodnoty všech prvků jsou uvedeny v tabulce (tab. 3).

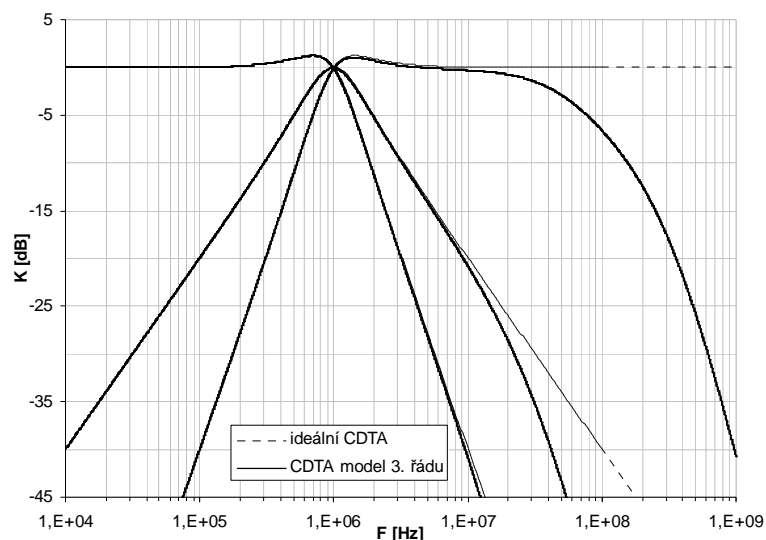


Obr. 20. Model prvku CDTA třetí úrovně v programu Pspice.

Hodnoty pracovních odporů a kapacit jsou  $R_{1-6} = 1$  k $\Omega$ ,  $C_{1-2} = 1$  nF. Ostatní hodnoty „parazitních“ součástek byly vyčteny z katalogových listů pro AD 844 [10] a MAX 435 [11] a jsou uvedeny v tabulce (tab. 3). Hodnoty  $g_m$  prvků byly získány z (29).

$R_{in} [\Omega]$	50	$C_{in} [F]$	6p
$R_t [\Omega]$	1meg	$C_t [F]$	14p
$R_{out1-3} [\Omega]$	1meg	$C_{out1-3} [F]$	6p

Tab. 3. Hodnoty součástek v programu PSpice.



**Obr. 21.** Frekvenční odezva KHN filtru s CDTA modelem třetí úrovně.

Mezní kmitočet byl stanoven na  $f_c = 1$  MHz a zněj vypočítány hodnoty transkonduktancí. Činitele jakosti je  $Q = 1$ . Simulace určila mezní kmitočet na  $f_c = 985$  kHz. Rozdíl simulovaného kmitočtu od teoretického je 15 kHz. Kapacita  $C_t$  z obr. 21, je tvořena součtem vstupních kapacit OTA ( $3 \times 4,5$  pF). Pokud by byla tato kapacita snižována, tak by se zapojení CDTA třetí úrovně začalo více podobat CDTA ideálnímu a odchylka mezního kmitočtu  $\Delta f$  by byla minimální. Z citlivostní analýzy lze upozorovat, že největší vliv na změnu mezního kmitočtu má právě transkonduktance  $g_m$  druhého a třetího bloku CDTA a hodnoty pracovních kapacit  $C_{1,2}$ . Co se týká bloku CDTA<sub>1</sub>, tak jeho citlivost na změnu mezního kmitočtu jde k nule.

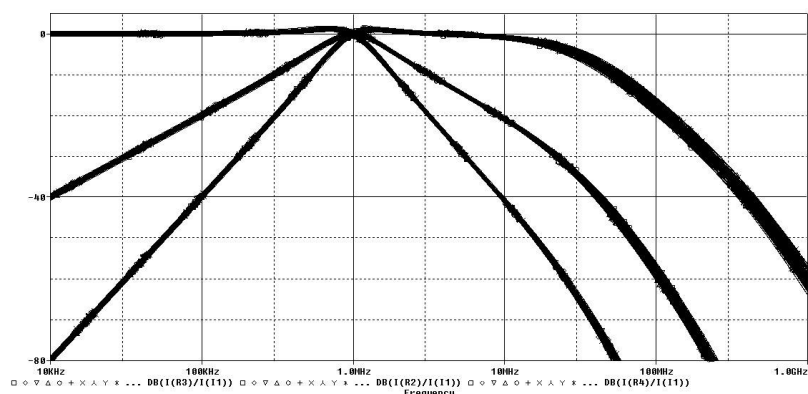
Parameters							Linear	
Component	Parameter	Original	@Min	@Max	Rel Sensitivity			
CDTA2.g2	VALUE	0.0063	6.2370m	6.3630m	4.8463k		100	
CDTA3.g1	VALUE	0.0063	6.2370m	6.3630m	4.8463k		100	
C2	VALUE	1n	1.0100n	990p	-4.8171k		99	
CDTA1.g2	VALUE	0.0063	6.2370m	6.3630m	4.7966k		98	
CDTA1.g1	VALUE	0.0063	6.3630m	6.2370m	-4.7712k		98	
C1	VALUE	1n	1.0100n	990p	-4.7702k		98	
CDTA1.Cl	VALUE	13p	13.1300p	12.8700p	-70.2090		1	
CDTA2.Cl	VALUE	13p	13.1300p	12.8700p	-68.8246		1	
CDTA3.Cl	VALUE	13p	13.1300p	12.8700p	-69.8580		1	
CDTA1.Cnt	VALUE	6p	5.9400p	6.0600p	160.9854m		< MIN >	

Specifications						
On/Off	Profile	Measurement	Original	Min	Max	
<input checked="" type="checkbox"/>	model_3_urovne.sim	CenterFrequency(db/(R8/M11),0.001)	985.4130k	986.3484k	1.0154meg	

**Obr. 22.** Citlivostní analýza filtru KHN s CDTA modelem třetí úrovně.

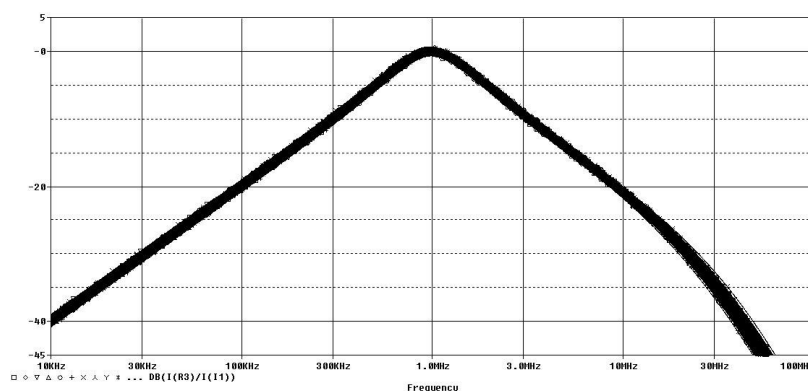
Při toleranční analýze Monte Carlo byla volena tolerance prvků ve schématu zapojení (obr. 19)  $R$  (1%),  $C$  (5%) a v modelu prvku CDTA (obr. 21)  $R$ ,  $C$  (30%) a  $g_{1-3}$  (5%).



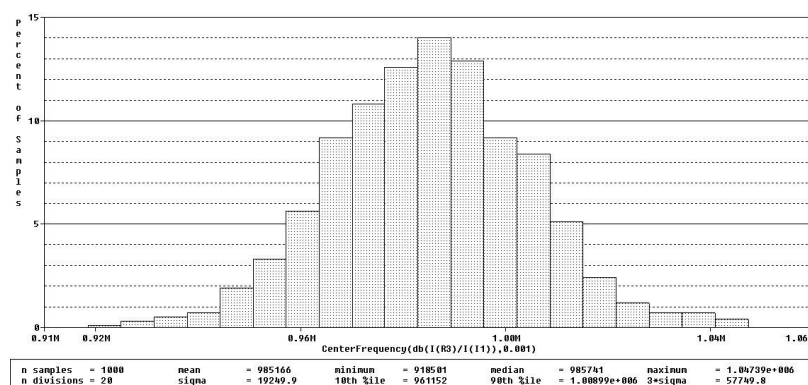


**Obr. 23.** Toleranční analýza KHN filtru s CDTA modelem třetí úrovně (pro 300 běhů).

Bohužel program PSpice neumožnil vykreslit závislosti DP, PP a HP při nastavení 1000 běhů společně do jednoho grafu. Proto je zde vykreslena samostatně pouze PP (obr. 24). Histogram (obr. 25) znázorňuje odchylky mezního kmitočtu při hromadné výrobě struktury KHN filtru s prvky CDTA.



**Obr. 24.** Toleranční analýza pásmové propusti KHN filtru s CDTA.

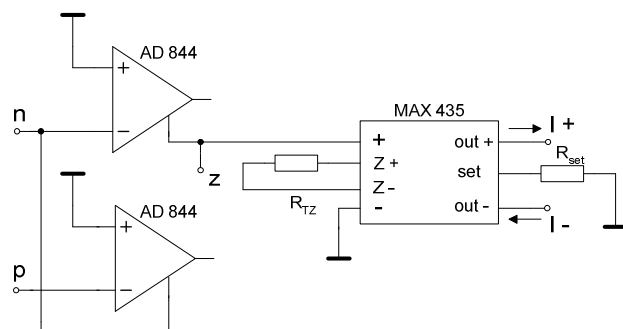


**Obr. 25.** Histogram KHN filtru CDTA modelem třetí úrovně.

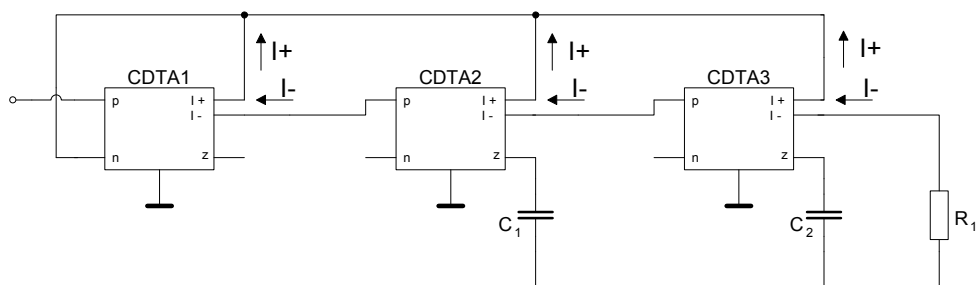
Pokud srovnáme histogram OZ a prvku CDTA je na první pohled vidět, že lepších vlastností dosahuje právě filtr s prvky CDTA. Odchylka průměrné hodnoty mezního kmitočtu od  $f_c = 1$  MHz je přibližně o 10 kHz menší než v případě filtru s OZ, konkrétně mezní kmitočet filtru s CDTA je  $f_c = 985$  KHz, nejhorší případy  $f_{min} = 918$  kHz a  $f_{max} = 1,05$  MHz. Také rozptyl a odchylka dosahují lepších hodnot. Rozptyl  $\Delta f_c = 19,5$  kHz.

## 4.5. KHN s CDTA realizovanými makromodely

Model prvku CDTA se skládá ze dvou transimpedančních zesilovačů AD 844 a z jednoho transkonduktoru MAX435 (obr. 26). U MAX 435 se nastavuje strmost transkonduktance  $g_m$  změnou velikosti externího odporu  $R_{TZ}$ . Schéma zapojení do struktury filtru KHN je ukázáno (obr. 27). Dle vztahu pro návrh filtru pro  $f_c = 1$  Mhz a  $Q = 1$  je zvoleno  $R_1 = 50 \Omega$ ,  $C_{1,2} = 1$  nF a  $R_{set} = 6,2$  k $\Omega$ . Pak pro vypočtené  $g_m$  podle (29) jsou  $R_{TZ}$  hodnoty nastavující strmost transkonduktance voleny v jednotlivých blocích následovně (tab. 4).



Obr. 26. Model prvku CDTA z AD 844 a MAX 345.



Obr. 27. Schéma zapojení struktury filtru KHN s CDTA z reálných součástek.

CDTA <sub>1</sub>	$R_{TZ} [\Omega]$	3000
CDTA <sub>2</sub>	$R_{TZ} [\Omega]$	635
CDTA <sub>3</sub>	$R_{TZ} [\Omega]$	635

Tab. 4. Hodnoty transkonduktancí v blocích CDTA.

U MAX 435 [11] platí

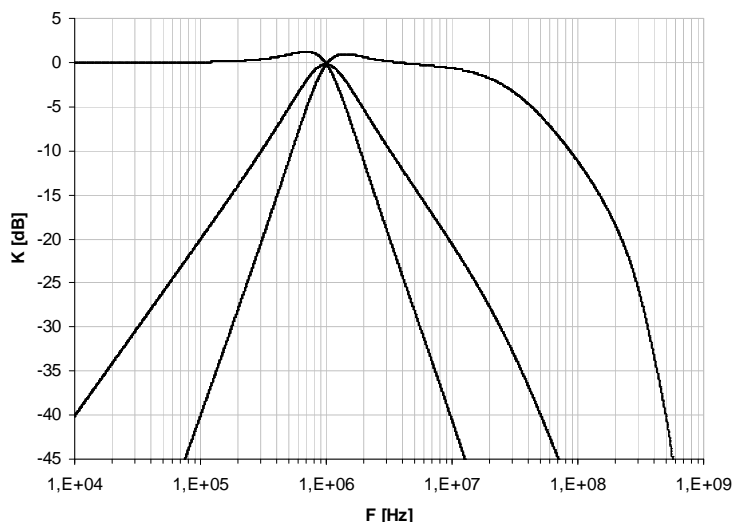
$$U_{out} = \frac{R_1}{R_{TZ}} K U_{inp}, \quad (30)$$

$$I_{out} = \frac{U_{out}}{R_1}, \quad (31)$$

$$I_{out} = \frac{K}{R_{TZ}} U_{inp} = g_m U_{inp}, \quad (32)$$

$$R_{TZ} = \frac{K}{g_m} = \frac{4}{6,3 \cdot 10^{-3}} = 635 \, \Omega, \quad (33)$$

kde  $R_1$  je hodnota zátěže,  $R_{TZ}$  je velikost impedance k nastavení transkonduktance. Velikost  $g_m$  byla převzata z ideálního návrhu CDTA a hodnota  $K$  byla zjištěna z katalogového listu k MAX 435 [11].



**Obr. 28.** Frekvenční odezva KHN filtru s CDTA z AD 844 a MAX 345.

Velikost  $R_{TZ}$  v  $CDTA_1$  nemá vliv na změnu mezního kmitočtu. Podle simulací lze tímto ovlivnit překmit modulové charakteristiky (asi 30 MHz) a snížit riziko nestability. Pomocí  $R_{TZ}$  v  $CDTA_{2,3}$  se nastavuje mezní kmitočet. Ten je teoreticky stanoven na  $f_c = 1$  MHz, simulací bylo zjištěno, že mezní kmitočet je  $f_c = 986$  kHz. Součástí simulací byla i citlivostní analýza. Hodnoty všech součástek při citlivostní analýze byly nastaveny na 1%.

						Parameters	
Component	Parameter	Original	@Min	@Max	Rel Sensitivity		Linear
CDTA3.Rtz	VALUE	635	641.3500	628.6500	-4.9597k		100
C2	VALUE	1n	1.0100n	990p	-4.9351k		99
CDTA2.Rtz	VALUE	635	641.3500	628.6500	-4.8659k		98
C1	VALUE	1n	1.0100n	990p	-4.8413k		97
CDTA1.Rtz	VALUE	3k	3.0300k	2.9700k	-118.9917		2
CDTA1.Rset	VALUE	6.2000k	6.2000k	6.2000k	0		0
Specifications							
On/Off	Profile	Measurement			Original	Min	Max
<input checked="" type="checkbox"/>	cdta s ad a max sim	CenterFrequency(DB/(C2/(1)))0.001			986.1408k	986.8045k	1.0060meg

**Obr. 29.** Citlivostní analýza filtru KHN s CDTA.

Z citlivostní analýzy lze vidět, že největší podíl na změně mezního kmitočtu mají právě prvky  $R_{TZ}$  v blocích  $CDTA_{2,3}$  a také hodnoty kapacit připojených k těmto blokům.

## 5. Použité analýzy

### 5.1. Toleranční analýza Monte-Carlo

Analýza Monte-Carlo na počítači simuluje hromadnou výrobu uváděného filtru. Udává v jakém intervalu se budou nacházet námi sledované závislosti od nominální hodnoty. Tato práce bude sledovat mezní kmitočet či činitel jakosti (Q) filtru. Monte-Carlo vybírá náhodně podle rovnoměrné či normální hustoty rozložení pravděpodobnosti hodnoty parametrů součástek ze zadaného tolerančního intervalu. Výsledkem toleranční analýzy je pak svazek křivek (např. kmitočtových charakteristik) reprezentovaný jednotlivými běhy simulace.

### 5.2. Citlivostní analýza

Citlivostní analýza kmitočtových filtrů [17] udává míru ovlivnění tvaru kmitočtové charakteristiky (citlivost přenosové funkce), mezního kmitočtu, případně činitel jakosti v zadaném kmitočtovém pásmu v závislosti změnách použitých součástek v obvodu. Součástí citlivostní analýzy modulem Pspice AA (PSpice Advanced Analysis) jsou také výsledky Worst Case, které udávají nejhorší možnou (nehorší případ vůbec) odchylku od nominální hodnoty mezního kmitočtu (či jiného parametru). Nejvíce využívanými citlivostními funkcemi [2] jsou citlivosti absolutní (34), relativní (35) a semi-relativní (36)

$$S_{abs\_q_i}^K(s) = \frac{\partial K(s)}{\partial q_i}, \quad (34)$$

$$S_{rel\_q_i}^K(s) = \frac{\partial K(s)}{\partial q_i} \cdot \frac{q_i}{K(s)}, \quad (35)$$

$$S_{semirel\_q_i}^K(s) = \frac{\partial K(s)}{\partial q_i} \cdot \frac{q_i}{100}. \quad (36)$$

Program PSpice v Advanced Analysis umožňuje absolutní a semi-relativní vyjádření citlivostí. V následující část ukazuje jak lze ke stejným výsledkům v programu PSpice dojít ručně pomocí derivací. Ve vztazích (34) až (36) je  $K = K(s)$  je komplexní přenos filtru a  $q_i$  značí parametr  $i$ -tého prvku obvodu. V této práci jsou simulované obvody v proudovém módu, proto platí

$K = \frac{I_0}{I_i}$ . Pokud za  $K(s)$  v (35) dosadíme např. rovnici pro výpočet činitele

jakosti, mezního kmitočtu konkrétního filtru a za  $q_i$  nějaký parametr z obvodu např. rezistor (pasivní součástka), dostaneme po výpočtu bezrozměrnou veličinu. Ta udává, jakou měrou se změna součástky podílí na změně kmitočtové charakteristiky filtru. Stejným postupem se řeší prakticky více říkající citlivosti např. změny mezního kmitočtu či činitele jakosti na změny parametrů obvodu, na což je v této kapitole také zaměřena pozornost.

Pokud sečteme všechny vypočítané relativní citlivosti, jedná se o případ Worst Case, který udává největší možné ovlivnění kmitočtové charakteristiky. Platí tedy

$$worstS_q^K(s) = \sum_{i=1}^N \left| \operatorname{Re} S_{q_i}^K(s) \right|. \quad (37)$$

### 5.3. Ukázka výpočtu citlivostí

Následující část ukazuje, jak se dá vypočítat absolutní, relativní a semi-relativní citlivost. Získané výsledky jsou porovnány s výsledky v programu PSpice. Pro výpočet je využita přenosová funkce (22), rovnice pro mezní kmitočet  $\omega_c$  (26) a bude sledováno do jaké míry změna transkonduktance v blocích CDTA ovlivní mezní kmitočet

$$\omega_c = \sqrt{\frac{g_2 g_3}{C_1 C_2}}. \quad (38)$$

Pro výpočet absolutní citlivosti se vychází ze vzorce (34), využít je (38) a následně derivováno. Získáno je obecné vyjádření pro absolutní citlivost  $g_2$

$$S_{abs-g_2}^{\omega_c} = \frac{\partial \omega_0}{\partial g_2} = \frac{1}{2} \left( \frac{g_2 g_3}{C_1 C_2} \right)^{-\frac{1}{2}} \left( \frac{C_1 C_2 g_3}{C_1^2 C_2^2} \right) = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\frac{g_2 g_3}{C_1 C_2}}}{g_2} \text{rad.s}^{-1}/S. \quad (39)$$

Relativní citlivost lze spočítat podle (35). Pro usnadnění výpočtu, se vyplatí využít výpočet z (39). Po matematické úpravě je získána relativní citlivost a semirelativní citlivost obvodu na  $g_2$

$$S_{rel-g_2}^{\omega_c} = \frac{\partial \omega_0}{\partial g_2} \cdot \frac{g_2}{\omega_0} = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\frac{g_2 g_3}{C_1 C_2}}}{g_2} \cdot \frac{g_2}{\sqrt{\frac{g_2 g_3}{C_1 C_2}}} = \frac{1}{2}, \quad (40)$$

$$S_{semirel-g_2}^{\omega_c} = \frac{\partial \omega_0}{\partial g_2} \cdot \frac{g_2}{100} = \frac{1}{200} \sqrt{\frac{g_2 g_3}{C_1 C_2}} = \frac{1}{200} \sqrt{\frac{6,3 \cdot 10^{-3} \cdot 6,3 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot 10^{-9}}} = 31500 \text{rad.s}^{-1}/\% . \quad (41)$$

Převod na semirelativní citlivost udávanou programem PSpice je

$$S_{semirel-g_2}^{\omega_c} = \frac{S_{semirel-g_2}^{\omega_c}}{2\pi} = \frac{31500}{2\pi} = 5013 \text{ Hz} / \% . \quad (42)$$

Aby bylo možno porovnat vypočtené výsledky s výsledky získanými v programu PSpice, je nutné výsledky z programu PSpice převést na hodnotu relativní citlivosti. To se provede takto

$$S_{rel-g_2}^{\omega_c} \cdot \frac{100}{f_c} = 5010,38 \cdot \frac{100}{1.10^6} = 0,501 . \quad (43)$$

Podobně pro relativní citlivost mezního kmitočtu na změny ostatních parametrů, protože se jedná vždy o stejný výraz (38) a prvky na stejných pozicích, potom pro ostatní citlivosti platí

$$S_{rel-g_2}^{\omega_c} = S_{rel-g_3}^{\omega_c} = \frac{1}{2}, \quad S_{rel-C_1}^{\omega_c} = S_{rel-C_2}^{\omega_c} = -\frac{1}{2} . \quad (44), (45)$$

Následuje výpočet citlivostí pro činitel jakosti  $Q$ . Vychází se ze vzorce (46) a postup je obdobný jako v předchozí části při výpočtu citlivosti mezního kmitočtu, tj.

$$Q = \sqrt{\frac{C_1 g_3}{C_2 g_2}} , \quad (46)$$

$$S_{abs-g_2}^Q = \frac{\partial Q}{\partial g_2} = \frac{1}{2} \left( \frac{C_1 g_3}{C_2 g_2} \right)^{-\frac{1}{2}} \left( -\frac{C_1 C_2 g_3}{C_2^2 g_2^2} \right) = -\frac{1}{2} \frac{\sqrt{\frac{C_1 g_3}{C_2 g_2}}}{g_2} S^{-1}, \quad (47)$$

$$S_{rel-g_2}^Q = \frac{\partial Q}{\partial g_2} \cdot \frac{g_2}{Q} = -\frac{1}{2} \frac{\sqrt{\frac{C_1 g_3}{C_2 g_2}}}{g_2} \cdot \frac{g_2}{\sqrt{\frac{C_1 g_3}{C_2 g_2}}} = -\frac{1}{2}, \quad (48)$$

$$S_{rel-g_3}^Q = \frac{\partial Q}{\partial g_3} \cdot \frac{g_3}{Q} = \frac{1}{2} \left( \frac{C_1 g_3}{C_2 g_2} \right)^{-\frac{1}{2}} \left( \frac{C_1 C_2 g_2}{C_2^2 g_2^2} \right) \cdot \frac{g_3}{\sqrt{\frac{C_1 g_3}{C_2 g_2}}} = \frac{1}{2} . \quad (49)$$

Pro ostatní citlivosti platí

$$S_{rel-g_2}^Q = S_{rel-C_2}^Q = -\frac{1}{2}, \quad S_{rel-g_3}^Q = S_{rel-C_1}^Q = \frac{1}{2} . \quad (50), (51)$$

Podle přenosové funkce (22) nebude obvod citlivý na parametr  $g_1$ . To lze i ověřit teoretickým výpočtem jak je ukázáno

$$S_{abs-g_1}^Q = \frac{\partial Q}{\partial g_1} = \frac{1}{2} \left( \frac{C_1 g_3}{C_2 g_2} \right)^{-\frac{1}{2}} \left( \frac{0}{C_2^2 g_2^2} \right) = 0 S^{-1}, \quad (52)$$

$$S_{rel-g_1}^Q = \frac{\partial Q}{\partial g_1} \cdot \frac{g_1}{Q} = 0 \cdot \frac{g_1}{\sqrt{\frac{C_1 g_3}{C_2 g_2}}} = 0. \quad (53)$$

Srovnání výsledků citlivostí získaných simulací s výsledky citlivostí získanými v části (4.4) je uvedeno v tab. 5. Simulace filtru KHN s CDTA modelem 3. úrovně určila citlivost parametrů  $g_2 = g_3 = 4,846k$ ,  $C_1 = -4,770k$  a  $C_2 = -4,817k$ . Aby bylo možné srovnání s teoreticky získanými hodnotami je nutný převod výsledků (podle (43)). Hodnoty získané simulací se od teoretických nepatrně liší, to však může být způsobeno tím, že obvod ještě není optimalizován a samozřejmě přesností numerické simulace.

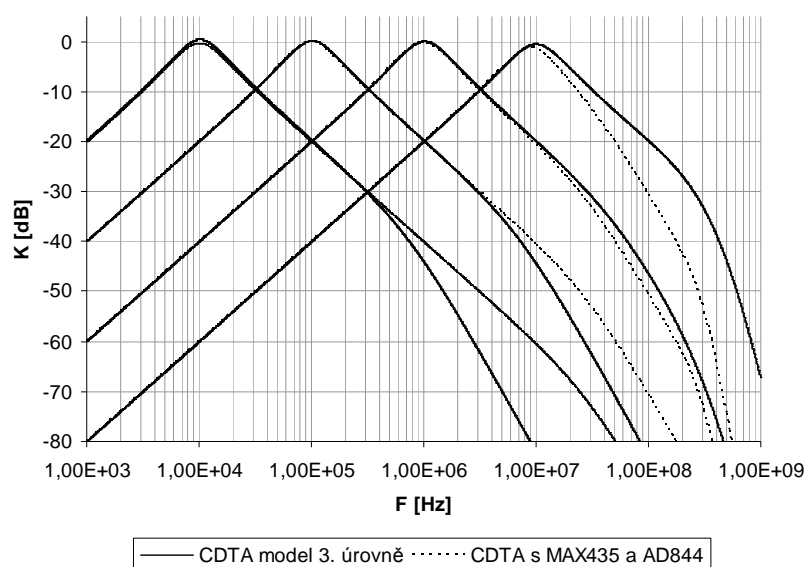
	$S_{semirel}^{\omega_c}$ [Hz/%]	$S_{rel}^{\omega_c}$	$S_{rel}^{\omega_c}$
citlivost na	<b>PSpice</b>	<b>relativní (přepočteno z PSpice AA)</b>	<b>teoretická</b>
$g_2$	4,846k	0,48	0,5
$g_3$	4,846k	0,48	0,5
$C_1$	-4,770k	-0,48	-0,5
$C_2$	-4,817k	-0,48	-0,5

**Tab. 5.** Srovnání výsledků citlivostní analýzy z kapitoly 4.4 s teoretickým předpokladem.

## 6. Možnosti návrhu a modifikace filtru

### 6.1. Ladění mezního kmitočtu KHN filtru s prvky CDTA modely 3. úrovně změnou transkonduktance

Model prvku CDTA má i možnost elektrického ladění transkonduktance. Tato změna má vliv kromě jiných parametrů obvodu také na mezní kmitočet. V následující části je ukázáno, jak se mění mezní kmitočet se změnou transkonduktance  $g_m$ . Změna transkonduktance v závislosti na kmitočtu je lineární, musí ale platit rovnost mezi jednotlivými transkonduktancemi v blocích CDTA<sub>2</sub> a CDTA<sub>3</sub>. V obr. 30. je pak ukázána změna kmitočtové charakteristiky filtrů CDTA s modely 3. úrovně a CDTA s makromodely. Pro přehlednost je v grafu vykreslen pouze průběh pásmové propusti.



Obr. 30. Ukázka ladění mezního kmitočtu  $f_c$  změnou transkonduktance  $g_m$ .

### 6.2. Sledování činitele jakosti KHN filtru s prvky CDTA modely 3. úrovně

Při návrhu filtru je důležité sledovat nejrůznější parametry obvodu jako je mezní kmitočet, šířka pásma a také činitel jakosti. V této práci je sledován činitel jakosti  $Q$  pásmové propusti KHN filtru s prvky CDTA modely třetí úrovně. Aby se tak stalo, musí se najít vzájemné vztahy mezi rovnicemi (dodržovat správný poměr  $Q$  a  $f_c$ ), které definují dané zapojení, vazby mezi jednotlivými parametry obvodu tedy  $R$ ,  $C$  a transkonduktance  $g_m$ . Nabízí se však jednoduché řešení a to, zařadit do zpětnovazební větve ( $out1$ ) druhého bloku CDTA zesilovač OTA (obr. 31). Zařazením zesilovače OTA do zpětnovazební větve se tedy nabízí jednoduché a elegantní ladění činitele jakosti. Výsledky simulace jsou ukázány (obr. 32).



Schéma zapojení (obr. 31) bylo analyzováno v programu SNAP a byla získána přenosová funkce zapojení

$$D(s) = s^2 + s \frac{R_Q g_Q g_2}{C_1} + \frac{g_2 g_3}{C_1 C_2} = s^2 + s \frac{\omega}{Q} + \omega^2. \quad (54)$$

Následnými matematickými úpravami byl získán výraz pro ladění činitele jakosti obvodu

$$\frac{\omega}{Q} = \frac{R_Q g_Q g_2}{C_1}, \quad \omega = \sqrt{\frac{g_2 g_3}{C_1 C_2}}, \quad (55), (56)$$

$$Q = \frac{C_1}{R_Q g_Q g_2} \cdot \sqrt{\frac{g_2 g_3}{C_1 C_2}},$$

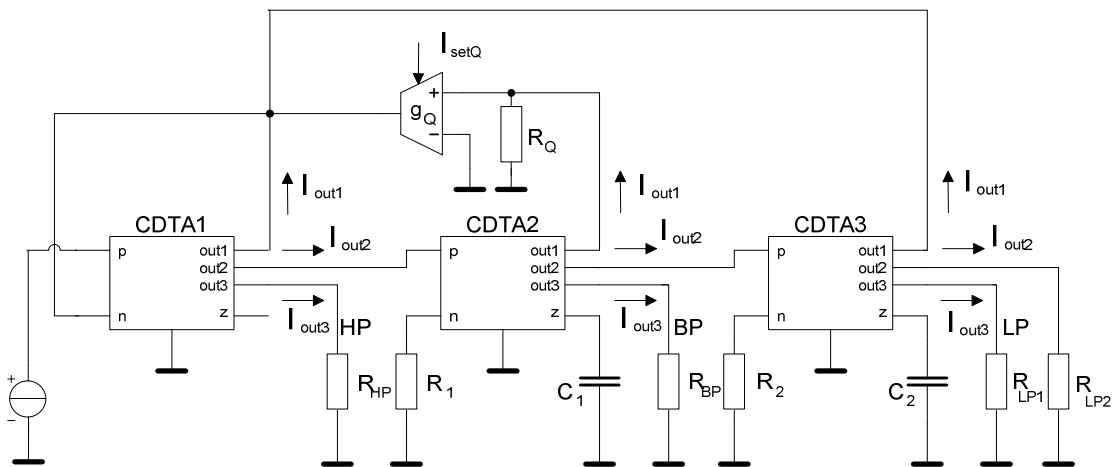
$$Q = \sqrt{\frac{C_1 g_3}{R_Q^2 g_Q^2 g_2 C_2}}. \quad (57)$$

Pokud je uvažováno, že  $C_1 = C_2$  a  $g_2 = g_3$ , celý výraz se zjednoduší a platí

$$Q = \frac{1}{R_Q g_Q},$$

$$g_Q = \frac{1}{R_Q Q}, \quad (58)$$

kde  $g_Q$  je zisk zesilovače OTA ve zpětnovazební větvi druhého CDTA,  $R_Q$  je hodnota odporu a  $Q$  je činitel jakosti obvodu. V zapojení jsou hodnoty součástek voleny následovně:  $C_1 = C_2 = 1$  nF,  $g_1 = g_2 = g_3 = 6,3$  mS,  $R_Q = 1$  kΩ a ostatní hodnoty rezistorů zůstávají stejné jako v předchozích zapojeních.

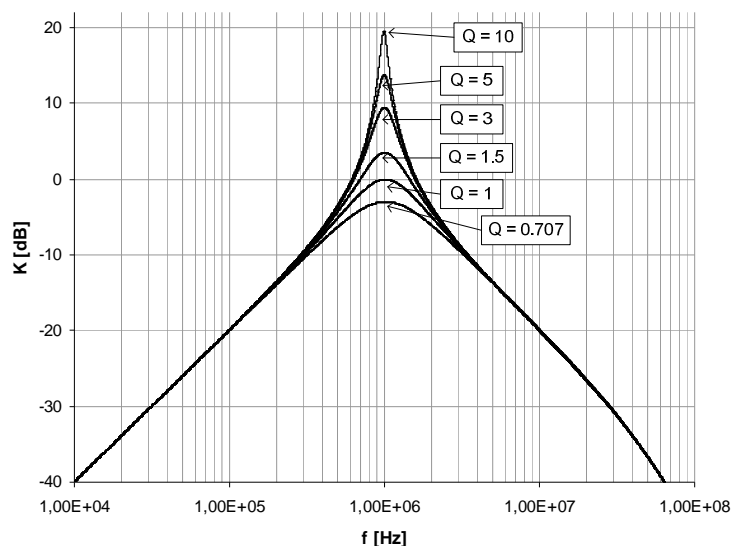


**Obr. 31.** Schéma zapojení struktury filtru KHN s prvky CDTA pro ladění činitele jakosti obvodu v programu PSpice.

Podle (58) pro zvolené  $Q$  byla dopočítána hodnota parametru  $g_Q$  (tab. 6). Na obr. 32 je vynesena modulová kmitočtová charakteristika PP v závislosti na změně parametru  $g_Q$ .

$Q$	0,707	1	1,5	3	5	10
$g_Q$ [mS]	1,41	1,00	0,67	0,33	0,20	0,10

**Tab. 6.** Dopočítané hodnoty  $g_Q$ .



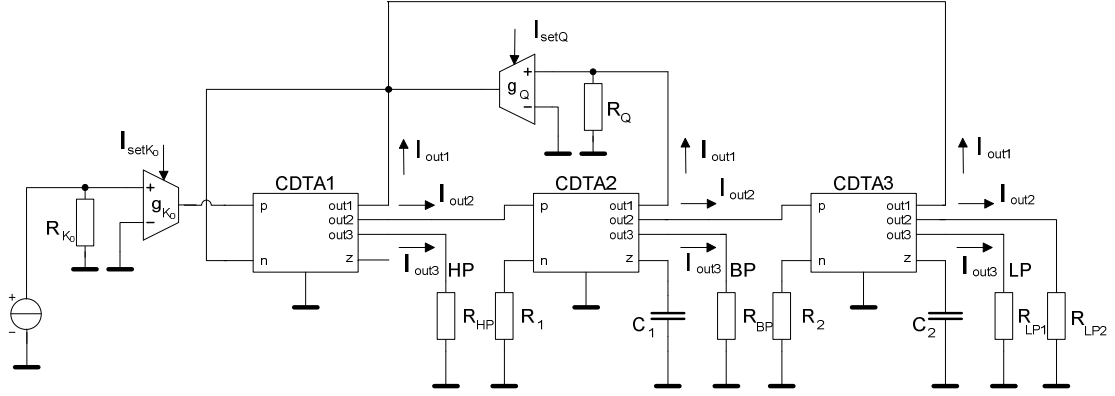
**Obr. 32.** Sledování činitele jakosti PP.

Pro zjištění činitele jakosti  $Q$  v programu PSpice byla využita funkce  $Q\_Bandpass\_XRange(DB(I(RBP)/I(I1)),3,100k,10M)$ . Výsledky simulace jsou porovnány s teoretickými výsledky v tab.7.

$g_Q$ [mS]	$Q$ Teorie	$Q$ PSpice
1,41	0,707	0,85
1,00	1	1,10
0,67	1,5	1,56
0,33	3	2,99
0,20	5	4,90
0,10	10	9,50

**Tab. 7.** Porovnání výsledků simulace a teorie.

Problém však je ten, že s měnícím se činitelem jakosti  $Q$  se současně mění i přenos v propustném pásmu  $K_0$ . Pokud se zapojení modifikuje podle (obr. 33), kde CDTA<sub>1</sub> plní funkci zesilovače s regulovatelným zesílením, potom je možno měnit i základní přenos obvodu  $K_0$ . Při současné změně  $g_Q$  a  $g_{K0}$  se mění šířka pásma PP bez ovlivnění základního přenosu  $K_0$ .



**Obr. 33.** Schéma zapojení struktury filtru KHN s prvky CDTA pro nastavování činitele jakosti a základního přenosu obvodu v programu PSpice.

Sledována byla také citlivost  $f_c$  obvodu na prvky v zapojení. Aby bylo možné výsledky simulace ověřit, musí se vypočítat pomocí derivací teoretická citlivost. Postup je obdobný jako v kapitole 5.3, pouze se vychází ze vzorců (55, 56) pro dané zapojení na obr. 31 platí přenosová funkce (54) poté

$$S_{abs-g_3}^Q = \frac{\partial Q}{\partial g_3} = \frac{1}{2} \left( \frac{g_3 C_1}{R_Q^2 g_Q^2 g_2 C_2} \right)^{-\frac{1}{2}} \left( \frac{C_1}{R_Q^2 g_Q^2 g_2 C_2} \right) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{C_1 g_3}}{R_Q g_Q g_3} S^{-1}, \quad (59)$$

$$S_{rel-g_3}^Q = \frac{\partial Q}{\partial g_3} \cdot \frac{g_3}{Q} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{C_1 g_3}}{R_Q g_Q g_3} \cdot \frac{g_3}{\sqrt{\frac{g_3 C_1}{R_Q^2 g_Q^2 g_2 C_2}}} = \frac{1}{2}, \quad (60)$$

$$S_{abs-R_Q}^Q = \frac{\partial Q}{\partial R_Q} = \left( \frac{g_3 C_1}{R_Q^2 g_Q^2 g_2 C_2} \right)^{-\frac{1}{2}} \left( -\frac{2 g_3 C_1}{R_Q^3 g_Q^2 g_2 C_2} \right) = -\frac{\sqrt{C_1 g_3}}{R_Q^2 g_Q} S^{-1}, \quad (61)$$

$$S_{rel-R_Q}^Q = \frac{\partial Q}{\partial R_Q} \cdot \frac{R_Q}{Q} = -\frac{\sqrt{C_1 g_3}}{R_Q^2 g_Q} \cdot \frac{R_Q}{\sqrt{\frac{g_3 C_1}{R_Q^2 g_Q^2 g_2 C_2}}} = -1. \quad (62)$$

Pro ostatní citlivosti platí

$$S_{rel-g_2}^Q = S_{rel-C_2}^Q = -\frac{1}{2}, \quad S_{rel-g_3}^Q = S_{rel-C_1}^Q = \frac{1}{2}, \quad (63), (64)$$

$$S_{rel-R_Q}^Q = S_{rel-g_Q}^Q = -1. \quad (65)$$

Výsledky citlivostní analýzy jsou ukázány na obr. 34. Srovnání s teorií je ukázáno v tab. 8. Odchylka  $Q$  od teoretické hodnoty je přibližně 10%, podobná odchylka je i při srovnání přepočtené relativní citlivosti s teoretickou hodnotou. Odchylka je způsobena tím, že obvod není přesně navrhnut na  $Q = 1$ . Pokud by byl analyzovaný obvod optimalizován, výsledky citlivostí by se více přiblížily teoretickému předpokladu.

Parameters					
Component	Parameter	Original	@Min	@Max	Rel Sensitivity
RQ	VALUE	1k	1.0100k	990	-8.9688m
CDTA2.g1	VALUE	6.3000m	6.3630m	6.2370m	-8.8235m
CDTA1.g2	VALUE	6.3000m	6.3630m	6.2370m	-4.4927m
CDTA1.g1	VALUE	6.3000m	6.2370m	6.3630m	4.5565m
C1	VALUE	1n	990p	1.0100n	4.4482m
CDTA2.g2	VALUE	6.3000m	6.2370m	6.3630m	4.3501m
CDTA3.g1	VALUE	6.3000m	6.2370m	6.3630m	4.3501m
C2	VALUE	1n	1.0100n	990p	-4.2849m
CDTA2.Cout1	VALUE	6p	6.0600p	5.9400p	-154.5902u
CDTA1.Cin1	VALUE	6p	5.9400p	6.0600p	547.6769n
					< MIN >
Specifications					
On/Off	Profile	Measurement	Original	Min	Max
☑	model_3_urovne.sim	O_Bandpass_VRange(DB(C2)) 3.10k...	1.1042	1.0608	1.1605

Obr. 34. Analýza citlivosti  $Q$  pásmové propusti.

	$S_{semirel}^Q$ [1/%]	$S_{rel}^Q$	$S_{rel}^Q$
citlivost na	PSpice	relativní (přepočteno z PSpice AA)	teoretická
$g_2$	4,350m	0,44	0,5
$g_3$	4,350m	0,44	0,5
$C_1$	4,448m	0,45	0,5
$C_2$	-4,285m	-0,43	-0,5
$R_Q$	-8,968m	-0,90	-1
$g_Q$	-8,824m	-0,88	-1

Tab. 8. Srovnání výsledků analýzy citlivosti  $Q$  s teoretickými předpoklady.

### 6.3. Návrh KHN filtru s prvky CDTA modely 3. úrovně podle Butterworthovy aproximace

Návrh filtru je proveden pro hodnotu činitele jakosti  $Q = 0,707$ . Vychází se z rovnic (26), (28) získaných z přenosové funkce filtru modelu 3. úrovně.  $C_{1,2}$  voleno 1 nF,  $f_c = 1$  MHz a dopočítána transkonduktance bloků CDTA<sub>2,3</sub>

$$\frac{g_2}{C_1} = \frac{2\pi f}{Q}, \quad (66)$$

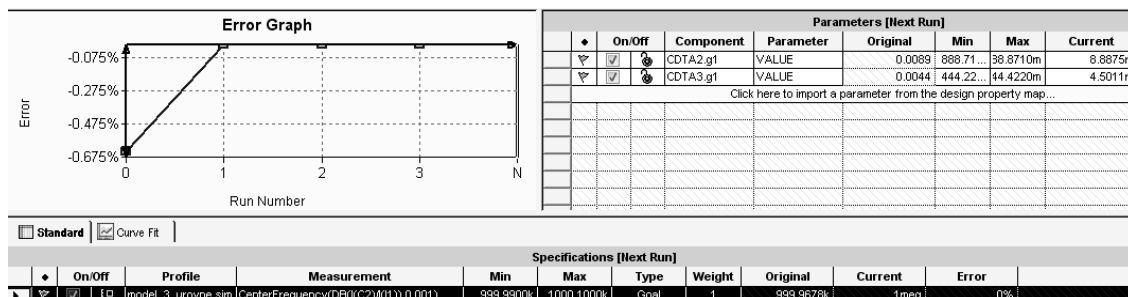
$$g_2 = \frac{2\pi f}{Q} \cdot C_1 = \frac{2\pi \cdot 1.10^6}{0,707} \cdot 1.10^{-9} = 8,89 \cdot 10^{-3} S. \quad (67)$$

a tu využiji k výpočtu hodnot  $g_3$

$$Q = \sqrt{\frac{C_1 g_3}{C_2 g_2}}, \quad (68)$$

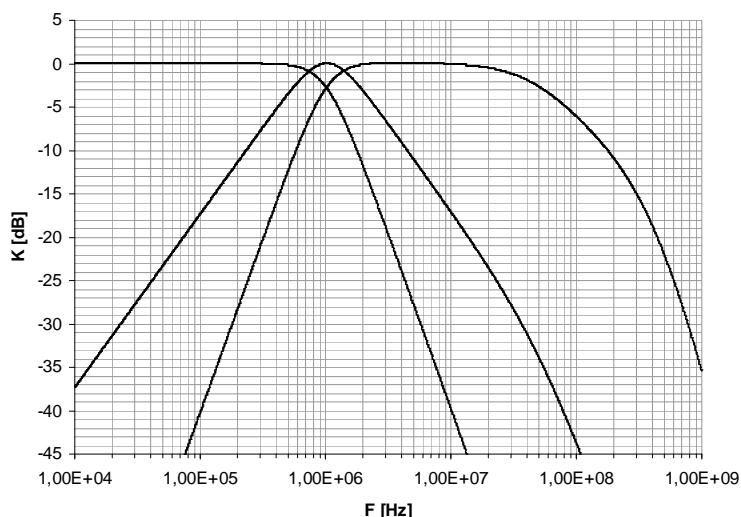
$$g_3 = \frac{Q^2 C_2 g_2}{C_1} = \frac{0,707^2 \cdot 1.10^{-9} \cdot 8,8871 \cdot 10^{-3}}{1.10^{-9}} = 4,44 \cdot 10^{-3} S. \quad (69)$$

Po simulaci je mezní kmitočet filtru je  $f_c = 981$  kHz. Aby filtr dosahoval co nejlepších výsledků, je provedena optimalizační analýza (obr. 35). Parametrem analýzy jsou vypočítané transkonduktance bloků CDTA<sub>2,3</sub>. Mezní kmitočet po optimalizaci je  $f_c = 1$  MHz, pokud  $g_2 = 8,89$  mS a  $g_3 = 4,50$  mS.



Obr. 35. Výsledky optimalizační metody v programu PSpice.

Modulová kmitočtová charakteristika (obr. 36) vykazuje známky Butterworthovy aproximace (průnik průběhů DP a HP je v hodnotě  $-3$  dB). Pro názornost byla provedena i citlivostní (obr. 37) a analýza Monte Carlo hromadné výroby (obr. 38).



Obr. 36. Modulová frekvenční charakteristika filtru.

Parameters					
Component	Parameter	Original	@Min	@Max	Rel Sensitivity
CDTA1.g1	VALUE	0.0063	6.3630m	6.2370m	-5.1243k
CDTA1.g2	VALUE	0.0063	6.2370m	6.3630m	5.0441k
CDTA2.g2	VALUE	0.0089	8.7982m	8.9760m	4.9778k
CDTA3.g1	VALUE	0.0045	4.4561m	4.5461m	4.9784k
C1	VALUE	1n	1.0100n	990p	-4.9652k
C2	VALUE	1n	1.0100n	990p	-4.8956k
CDTA1.C1	VALUE	13p	12.8700p	13.1300p	97.1803
CDTA2.C1	VALUE	13p	13.1300p	12.8700p	-64.9373
Specifications					
On/Off	Profile	Measurement	Original	Min	Max
On	model_3_urovne.sim	CenterFrequency(DB((C2)/M(1)),0.001)	1meg	970.0174k	1.0311meg

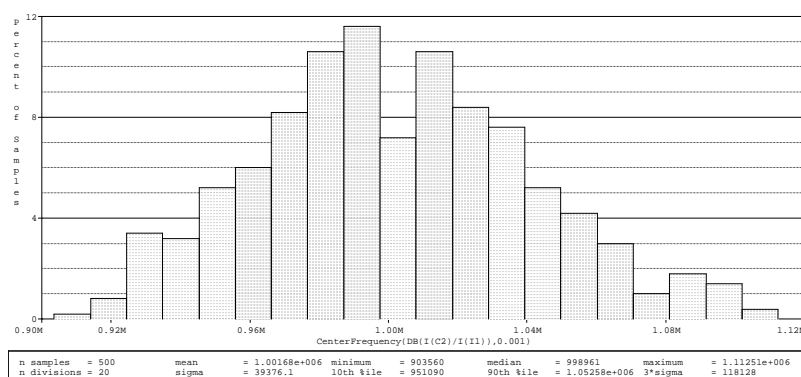
Obr. 37. Výsledky citlivostní analýzy na parametr PP.

Díky optimalizaci obvodu se hodnoty citlivostí při srovnání shodují s teoretickým předpokladem (tab. 9).

	$S_{semirel}^{\omega_c}$ [Hz/%]	$S_{rel}^{\omega_c}$	$S_{rel}^{\omega_c}$
citlivost na	PSpice	relativní (přepočteno z PSpice AA)	teoretická
$g_2$	4,978k	0,50	0,5
$g_3$	4,978k	0,50	0,5
$C_1$	-4,965k	-0,50	-0,5
$C_2$	-4,896k	-0,49	-0,5

**Tab. 9.** Srovnání výsledků citlivostní analýzy s teoretickým předpokladem.

Při toleranční analýze Monte Carlo (500 běhů) byla volena tolerance pracovních prvků  $R$  (1%),  $C$  (5%) a v CDTA modelu třetí úroveň  $R$ ,  $C$  (30%) a  $g_{1-3}$  (5%). Většina vyrobených filtrů tohoto typu bude mít mezní kmitočet  $f_c = 1$  MHz. Nejhorší případy z vyrobených pak  $f_{min} = 0,90$  MHz a  $f_{max} = 1,11$  MHz. Rozptyl je  $\Delta f = 39$  kHz.



**Obr. 38.** Histogram na parametr PP.

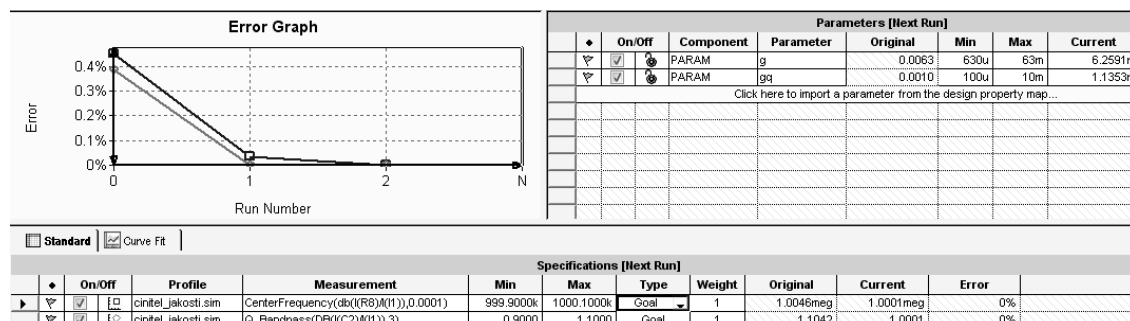
## 7. Optimalizace

### 7.1. Úvod

Optimalizace je proces doladování návrhu obvodu proměnnými konstrukčními parametry v zadaných mezích se snahou dosáhnout co nejpřesnějšího požadovaného výsledku. K tomu, aby se optimalizace nemusela dělat metodou pokus/omyl je program PSpice vybaven optimalizačním prostředím. PSpice Optimizer opakuje simulaci s tím, že mění parametry uživatelem k optimalizace zvolených součástek do té doby, dokud nedosáhne nebo se nepřiblíží požadovanému výsledku. Dokáže také sledovat více optimalizačních cílů. V práci jsou ukázány optimalizace struktury KHN filtru s prvky CDTA modelu třetí úrovně a také struktury KHN filtru s makromodely CDTA. Je očekáváno, že výsledky simulací se více přiblíží teoretickým předpokladům. To je ukázáno.

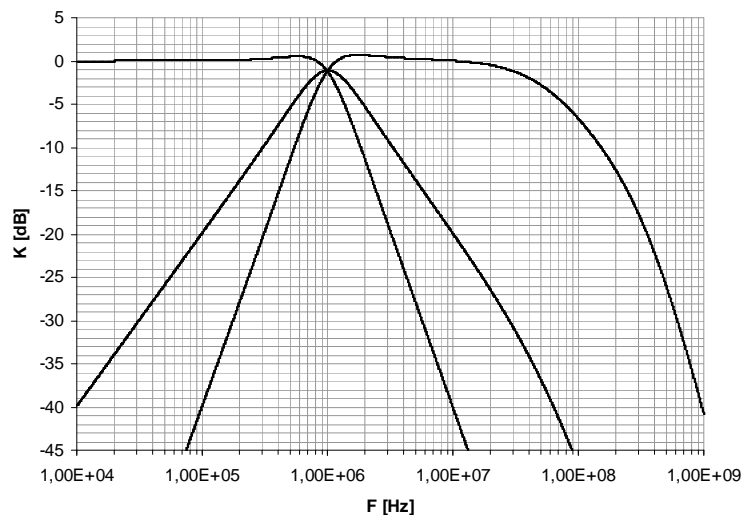
### 7.2. Optimalizace KHN filtru s CDTA modely 3. úrovně

Optimalizována je již dříve zmiňovaná struktura zapojení obr. 31. Cílem optimalizace je co možná nejpřesnější dosažení mezního kmitočtu  $f_c = 1$  MHz a činitele jakosti  $Q = 1$ . Nejvhodnějším parametrem pro ladění bude právě transkonduktance  $g_m$ , která je součástí každého bloku CDTA a  $g_Q$  ve zpětné vazbě CDTA<sub>2</sub>.



Obr. 39. Optimalizační prostředí v programu PSpice AA.

Nalezení požadovaného výsledku trvalo pouze tři běhy (obr. 39). Původní hodnota transkonduktance byla  $g_m = 6,3$  mS a mezní kmitočet  $f_c = 985$  kHz. Po optimalizaci obvod s navrženou transkonduktancí  $g_m = 6,26$  mS a  $g_Q = 1,14$  mS má mezní kmitočet téměř přesně  $f_c = 1$  MHz a činitel jakosti  $Q = 1$ . Zlepšení  $f_c$  dosahuje téměř 15 kHz. Modulová kmitočtová charakteristika je ukázána na obr. 40.



**Obr. 40.** Frekvenční odezva KHN filtru s CDTA modelem 3. úrovně po optimalizaci.

Výsledky citlivostní analýzy obvodu se po optimalizaci více přiblížily k hodnotě  $\pm 0,5$ , tedy i předpokladům uvedených v teoretické části. Pro srovnání dosažených hodnot optimalizací jsou uvedeny tabulky (tab. 11, 12). Hodnoty  $f_{min}$  a  $f_{max}$  udávají případ Worst Case při toleranci všech součástek 1%, hodnota sigma při tolerancích pracovních součástek  $R$  (1%),  $C$  (5%) a v modelu prvku CDTA  $R$ ,  $C$  (30%) a  $g_{1-3}$  (5%).

Parameters						
Component	Parameter	Original	@Min	@Max	Rel Sensitivity	Linear
CDTA1.g1	VALUE	0.0063	6.4000m	6.2732m	-5,1878k	100
CDTA1.g2	VALUE	0.0063	6.2732m	6.4000m	5,1801k	99
CDTA2.g2	VALUE	0.0063	6.2732m	6.4000m	5,1443k	99
CDTA3.g1	VALUE	0.0063	6.2732m	6.4000m	5,1432k	99
C1	VALUE	1n	1.0100n	990p	-5,0803k	97
C2	VALUE	1n	1.0100n	990p	-5,0404k	97
CDTA1.Cl	VALUE	13p	12.8700p	13.1300p	65,5716	1
CDTA2.Cl	VALUE	13p	13.1300p	12.8700p	-69,0077	1

Specifications					
On/Off	Profile	Measurement	Original	Min	Max
<input checked="" type="checkbox"/>	model_3_urovne.sim	CenterFrequency(DB((C2)),0.001)	1meg	970.1973k	1.0308meg

**Obr. 41.** Citlivostní analýza filtru KHN s CDTA modelem 3. úrovně po optimalizaci.

	$S_{semirel}^{\omega_c}$ [Hz/%]	$S_{rel}^{\omega_c}$	$S_{rel}^{\omega_c}$
citlivost na	PSpice	relativní (přepočteno z PSpice AA)	teoretická
$g_2$	5,144k	0,51	0,5
$g_3$	5,143k	0,51	0,5
$C_1$	-5,080k	-0,51	-0,5
$C_2$	-5,040k	-0,50	-0,5

**Tab. 10.** Srovnání výsledků citlivostní analýzy po optimalizaci s teoretickými.

	Před optimalizací	Po optimalizaci
$f_c$ [kHz]	985,17	1000,00
$f_{min}$ [kHz]	956,35	970,19
$f_{max}$ [MHz]	1,02	1,03
rozptyl [kHz]	19,25	24,25

**Tab. 11.** Porovnání KHN filtru s CDTA modelem třetí úrovně před a po optimalizaci.

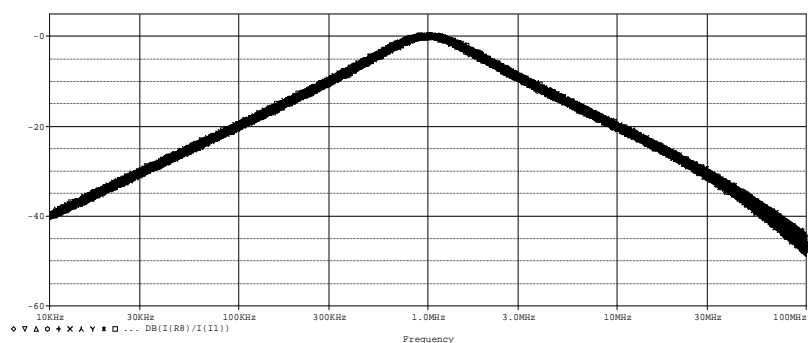
Toleranční analýza byla opět provedena pro 1000 běhů s 1000 body na dekádu na obr. 42. Tolerance součástek byly voleny následovně (tab. 12). Výsledný



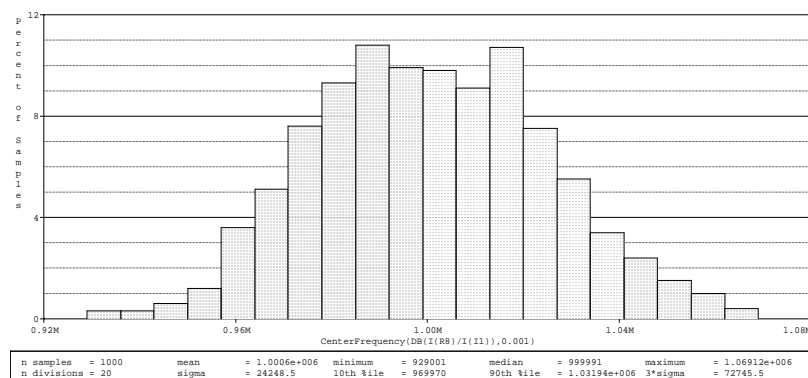
histogram je ukázán na obr. 43. Kvůli časové náročnosti výpočtu toleranční analýzy Monte Carlo jsou další zkoumané simulace prováděny pro 500 běhů s 500 body na dekádu. Hodnoty tolerancí součástek a výsledky simulací jsou uvedeny v tab. 13. Výsledné histogramy jsou součástí přílohy.

Tolerance				Druh analýzy	
model 3. úrovně		pracovní prvky		Worst Case	Monte Carlo
$R, C$ [%]	$g_m$ [%]	$C$ [%]	$R$ [%]	$\Delta f_c$ [kHz]	$\Delta f_c$ [kHz]
30	2	5	1	70	24

**Tab. 12.** Rozptyl  $f_c$  pro dané tolerance pasivních prvků a parametrů modelů.



**Obr. 42.** Toleranční analýza pásmové propusti KHN filtru s CDTA po optimalizaci.



**Obr. 43.** Histogram KHN filtru s CDTA modelem třetí úrovně po optimalizaci.

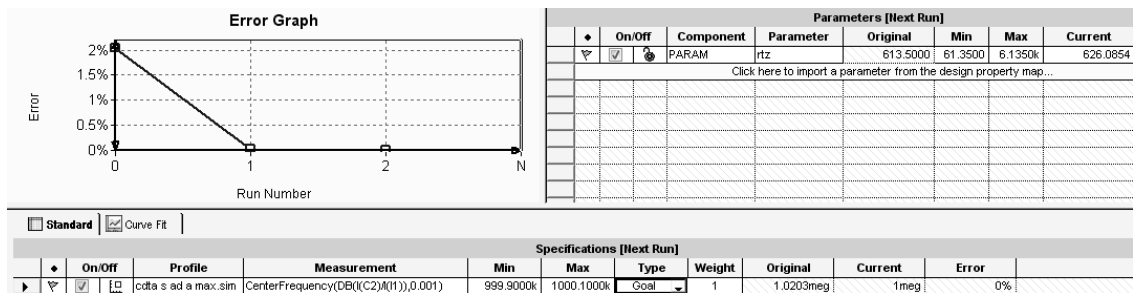
Je-li vyžadováno od zapojení co nejlepších vlastností, je důležité dát pozor na velikost tolerance transkonduktance  $g_m$ . Pokud její hodnota je neúměrně velká, zapojení nebude dosahovat požadovaných výsledků a stane se v praxi nepoužitelným (Worst Case udává velmi pesimistické výsledky). Orientační rozptyl mezního kmitočtu pro různé tolerance pracovních prvků a parametrů modelů je ukázán v tab. 13.

Tolerance				Druh analýzy	
model 3. úrovně		pracovní prvky		Worst Case	Monte Carlo
$R, C$ [%]	$g_m$ [%]	$C$ [%]	$R$ [%]	$\Delta f_c$ [kHz]	$\Delta f_c$ [kHz]
30	30	5	1	469	174
30	10	5	1	174	61
30	5	5	1	106	35
30	2	5	1	67	24
30	2	1	1	37	12

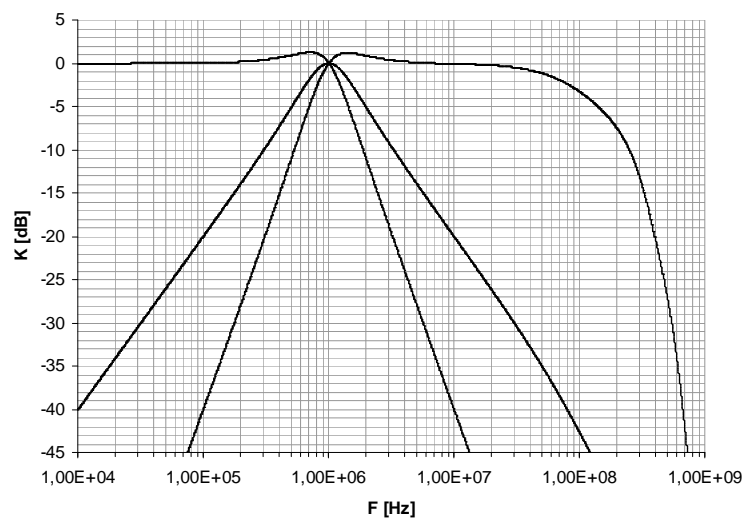
**Tab. 13.** Orientační rozptyl mezního kmitočtu pro různé tolerance pracovních prvků a parametrů modelů.

### 7.3. Optimalizace CDTA s makromodely

Optimalizace makromodelu CDTA bude probíhat změnou nastavení parametru odporu  $R_{TZ}$  v blocích CDTA<sub>2</sub> a CDTA<sub>3</sub>, který opět mění transkonduktanci  $g_m$  a tedy i mezní kmitočet zapojení. Hodnota odporu  $R_{TZ}$  v bloku CDTA<sub>1</sub> zůstala nastavena na 3 k $\Omega$ . K optimalizaci je použita struktura zapojení na obr. 29. Původní hodnota je  $R_{TZ} = 635$  k $\Omega$  a mezní kmitočet  $f_c = 986$  kHz. Optimalizací (obr. 44, 45) bylo dosaženo mezního kmitočtu přesně  $f_c = 1$  MHz s hodnotou  $R_{TZ} = 626,1$  k $\Omega$ , byl také kladen důraz na to, aby oba bloky měly ve výsledku stejnou hodnotu  $R_{TZ}$ .



Obr. 44. Optimalizace struktury KHN filtru s CDTA s makromodely.



Obr. 45. Modulová kmitočtová charakteristika struktury KHN filtru s CDTA s makromodely po optimalizaci.

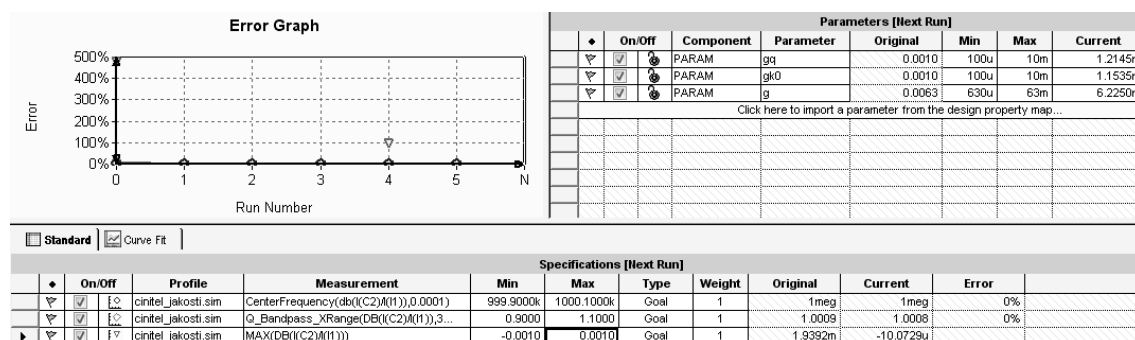
	Před optimalizací	Po optimalizaci
$f_{mez}$ [kHz]	986,14	1000,00
$f_{min}$ [kHz]	966,80	980,71
$f_{max}$ [MHz]	1,01	1,02

Tab. 14. Srovnání filtru KHN s CDTA s makromodely před a po optimalizaci.

## 7.4. Optimalizace $f_c$ , $Q$ , $K_0$ pásmové propusti filtru KHN s CDTA modely 3. úrovně

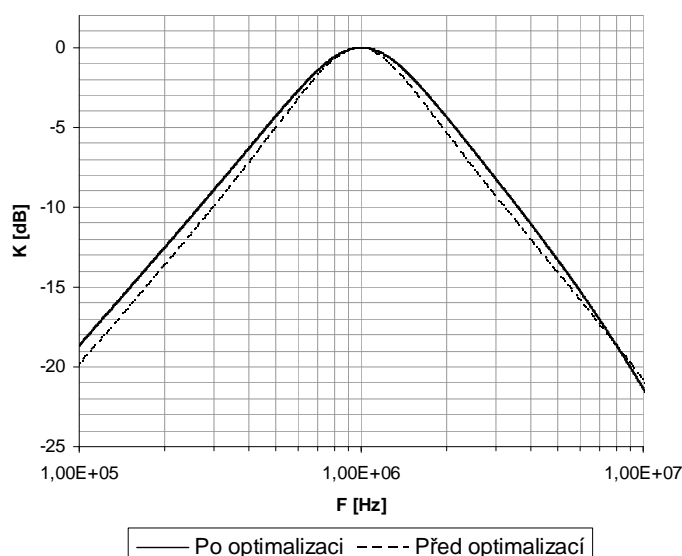
Optimalizace pásmové propusti filtru KHN s CDTA modely 3. úrovně s požadavkem na dosažení mezního kmitočtu  $f_c = 1$  MHz, činitele jakosti  $Q = 1$  a základního přenosu  $K_0 = 0$  dB je zaměřena na PP, protože optimalizace všech průběhů (i DP, HP) by vyžadovala složitější zásah. Jinak řečeno optimalizace PP ovlivní negativně DP a HP (např. posun  $K_0$ ). V praxi se pak stejně ve většině případů využívá pouze jedna ze zmiňovaných přenosových funkcí, takže tato skutečnost nevadí. Optimalizována je již dříve uvedená struktura zapojení na obr. 33. Parametry PSpice Optimizeru jsou  $g_Q$ ,  $g_{K0}$  a transkonduktance bloků CDTA<sub>2,3</sub>, kdy platí, že hodnota  $g_2 = g_3$ . Přenosová funkce filtru byla získána v programu SNAP a má tvar

$$D(s) = s^2 + s \frac{R_Q g_Q g_1 g_2}{C_1} + \frac{g_1 g_2 g_3}{C_1 C_2} = s^2 + s \frac{\omega}{Q} + \omega^2. \quad (70)$$



Obr. 46. Optimalizace PP filtru KHN s CDTA s modely 3. úrovně.

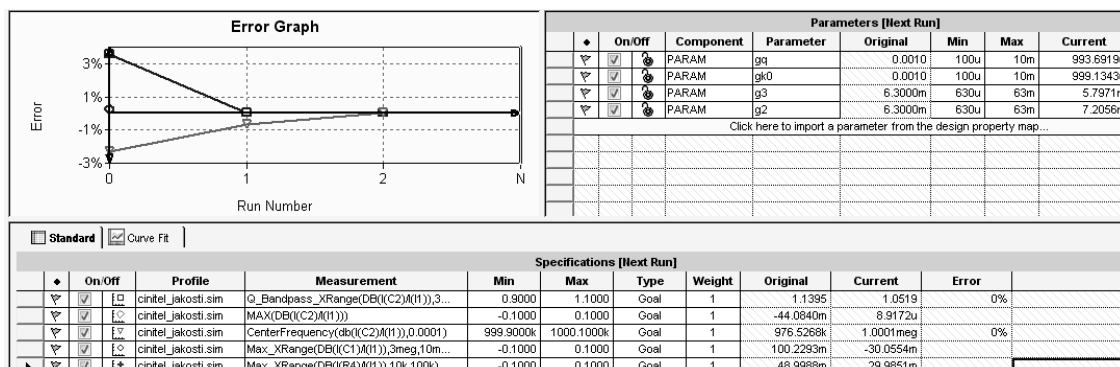
S parametry  $g_Q = 1,21$  mS,  $g_{K0} = 1,15$  mS,  $g_{2,3} = 6,23$  mS dosahuje zapojení požadovaných výsledků. Na obr. 47 je porovnán průběh PP před a po optimalizaci.



Obr. 47. Modulová kmitočtová charakteristika PP filtru KHN s CDTA s modely 3. úrovně po optimalizaci PP.

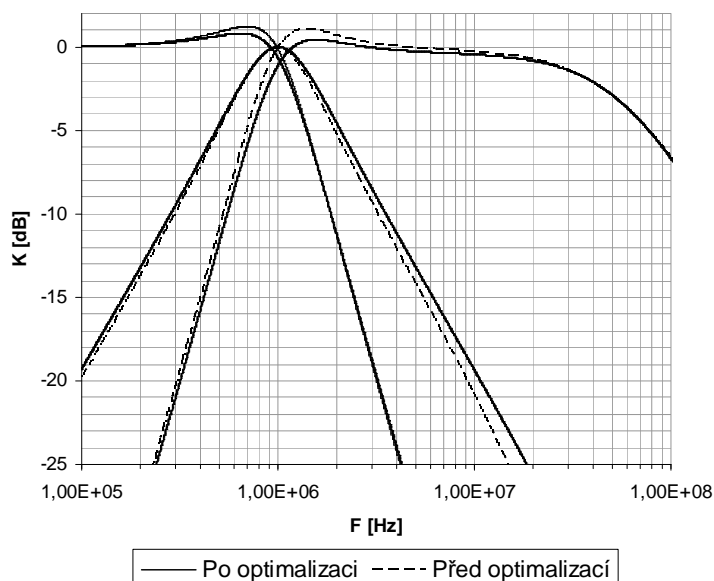
## 7.5. Optimalizace $f_c$ , $Q$ , $K_0$ dolní, pásmové a horní propusti filtru KHN s CDTA modely 3. úrovně

Optimalizace všech propustí (DP, PP, HP) filtru KHN s CDTA modely 3. úrovně, probíhá obdobně jako v předchozí části 7.4 pouze s tím rozdílem, že neplatí rovnost transkonduktance mezi bloky  $CDTA_{2,3}$ . Optimalizační parametr  $g$  se tedy rozdělí na dva ( $g_2$ ,  $g_3$ ) a parametry  $g_Q$  a  $g_{K0}$  zůstávají. Na obr. 48 je ukázán průběh optimalizace v programu PSpice a na obr. 49 srovnávací modulová kmitočtová charakteristika DP, PP, HP před a po optimalizaci.



Obr. 48. Optimalizace DP, PP, HP filtru KHN s CDTA s modely 3. úrovně.

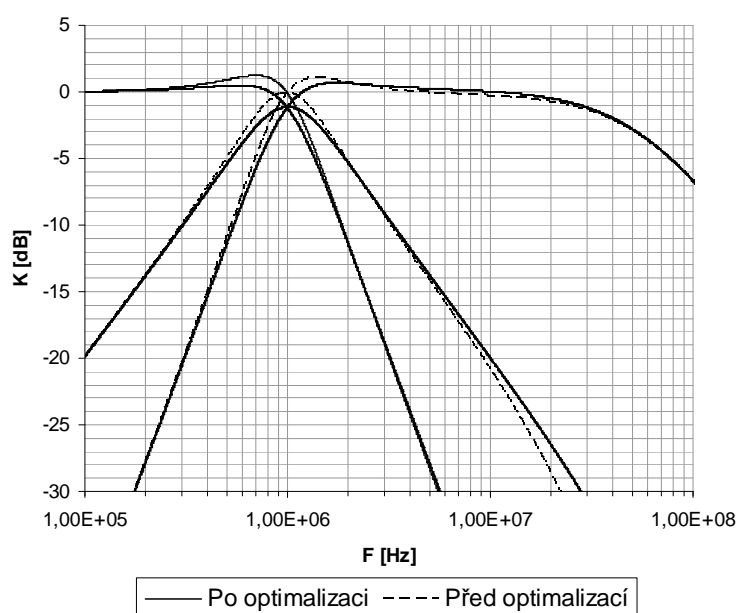
Optimalizace určila hodnoty parametrů následovně:  $CDTA_2 = 7,21 \text{ mS}$ ,  $CDTA_3 = 5,80 \text{ mS}$ ,  $g_Q = 994 \text{ } \mu\text{S}$  a  $g_{K0} = 999 \text{ } \mu\text{S}$ . Vlastnosti obvodu jsou:  $f_c = 1 \text{ MHz}$ ,  $Q = 1,05$ ,  $K_0 = 0 \text{ dB}$  pro PP. Základní přenos  $K_0$  pro DP a HP nevyšel přesně 0 dB a nastala malá odchylka. Vznik této odchylky by mohl vymizet další modifikací zapojení. Tato problematika však už není součástí této práce a mohlo by se jí zabývat v následujícím studiu.



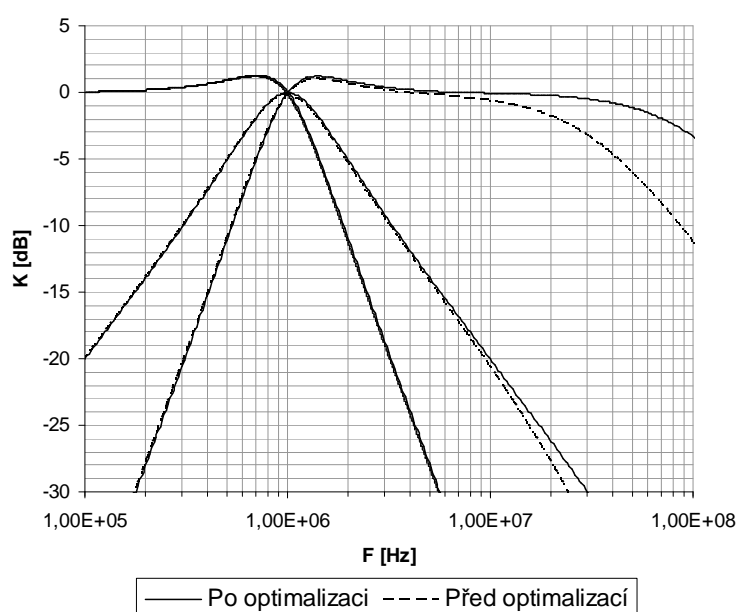
Obr. 49. Modulová kmitočtová charakteristika filtru KHN s CDTA s modely 3. úrovně před a po optimalizaci DP, PP, HP.

## 7.6. Srovnání dosažených výsledků

Tato podkapitola slouží k přehlednému srovnání dosažených výsledků. Optimalizace zapojení byla zaměřena na mezní kmitočet  $f_c$  a činitel jakosti  $Q$ . Na obrázcích jsou modulové kmitočtové charakteristiky filtrů KHN s CDTA modelem 3. úrovně z kapitoly 7.2 (obr. 50) a s CDTA s makromodely z kapitoly 7.3 (obr. 51) před a po optimalizaci.



**Obr. 50.** Srovnání modulových kmitočtových charakteristik KHN filtrů s CDTA modely 3. řádu před a po optimalizaci.



**Obr. 51.** Srovnání modulových kmitočtových charakteristik KHN filtrů s CDTA s makromodely před a po optimalizaci.

Analogová technika není až natolik přesná věda, aby bylo možné dosáhnout přesné shody s teoretickými předpoklady. V tab. 15 jsou porovnány dosažené teoretické výsledky s výsledky získanými simulacemi. Hodnoty  $f_{\min}$  a  $f_{\max}$  udávají případ Worst Case při toleranci všech součástek 1%. Worst Case  $\Delta f$  a sigma (rozptyl) jsou hodnoty při tolerancích pracovních součástek  $R$  (1%),  $C$  (5%) a v modelu prvku CDTA 3. úrovně  $R$ ,  $C$  (30%) a  $g_{1-3}$  (5%). Některé buňky v tabulce nejsou vyplněny. To je dáno tím, že číselný výsledek není (např. odchylky výsledku u teoretického předpokladu), simulaci nemělo smysl provádět (citlivostní analýza s makromodely - komplikované udání tolerance v netlistu). Nejlepších výsledků dosahuje filtr KHN s CDTA modelem 3. úrovně. Naopak nejhorších filtr KHN s OZ (samozřejmě bez optimalizace).

	Teorie	KHN s OZ	CDTA model 3.úrovně		CDTA makromodel	
			<i>před opt.</i>	<i>po opt.</i>	<i>před opt.</i>	<i>po opt.</i>
$f_c$ [MHz]	1,00	1,12	0,98	1,00	0,98	1,00
$Q$	1,00	1,20	1,12	1,00	1,11	1,11
$\sigma$ [kHz]	-	27	19	24	-	-
$\Delta f$ [kHz]	-	75	66	70	-	-
$f_{\min}$ [MHz]	-	1,08	0,95	0,97	0,96	0,98
$f_{\max}$ [MHz]	-	1,16	1,05	1,03	1,01	1,02
$S_{g2}$	0,50	-	0,48	0,50	-	-
$S_{g3}$	0,50	-	0,48	0,50	-	-
$S_{C1}$	-0,50	-	-0,48	-0,50	-	-
$S_{C2}$	-0,50	-	-0,48	-0,50	-	-

**Tab. 15.** Porovnání dosažených výsledků.

## 8. Závěr

Prvek CDTA nabízí poměrně jednoduchou realizaci filtrů pracujících v proudovém režimu. Simulace prokázaly, že vlastnosti struktury KHN filtru s prvky CDTA jsou o poznání lepší než vlastnosti KHN filtru s OZ pracujícími v napěťovém módu. Potvrdilo se také, že CDTA umožnil strukturu KHN pracovat na mnohem vyšších kmitočtech, až do desítek MHz. Citlivostní analýzy jsou prováděny numerickým modulem PSpice AA a jsou zaměřeny na  $f_c$  a  $Q$  filtru. Teoretické předpoklady citlivostí filtru KHN s CDTA modely 3. úrovně se shodovaly se simulačními výsledky. Součástí práce jsou také toleranční analýzy Monte Carlo filtru KHN s CDTA modely 3. úrovně. Sledovány byly  $\Delta f$  a  $\sigma$  pro různé tolerance pasivních prvků a parametrů modelů aktivních bloků. Je tak možné posuzovat jednotlivé tolerance prvků a sledovat a minimalizovat požadovaný rozptyl při hromadné výrobě. Zapojení KHN s CDTA modely 3. úrovně bylo podrobeno dalšímu zkoumání, byl sledován vliv změny transkonduktance bloků CDTA na změnu mezního kmitočtu sloužící k elektronickému ladění filtru. Po zařazení OTA do zpětnovazební větve druhého bloku CDTA se nabízí možnost ladění  $Q$  jak je ukázáno. V práci je také uveden návrh KHN filtru s CDTA modely 3. úrovně podle Butterworthovy aproximace. Nástrojem Optimizer, který je součástí pokročilých analýz programu PSpice AA, bylo zapojení KHN s CDTA modely 3. úrovně a s CDTA s makromodely optimalizováno na  $f_c = 1$  MHz a porovnáno s předchozími simulacemi. Další optimalizace se už zabývá pouze filtrem s CDTA s modely 3. úrovně a snaží se dosáhnout s daným zapojením co možná nejlepších výsledků ( $f_c = 1$  MHz,  $Q = 1$ ,  $K_0 = 1$  dB). To bylo dosaženo různými modifikacemi zapojení a přidáním dalších parametrů pro optimalizaci. Základní parametry obvodu ( $f_c$ ,  $Q$ ,  $K_0$ ,  $B$ ) se po optimalizaci více přiblížily teoretickým předpokladům, ukázáno v kapitole 7.6. Pouze při optimalizaci DP, PP a HP v kapitole 7.5 již nešlo dosáhnout přesnějších výsledků. Jelikož prvek CDTA ještě nebyl zařazen do hromadné výroby, tak všechny zde uvedené výsledky byly získány pomocí simulací a teoretických předpokladů. V praxi se však může stát, že struktura prvku CDTA nebude pracovat úplně přesně podle těchto předpokladů. Je totiž docela složitá a mohou se zde projevit parazitní vlivy, které naruší správnou funkčnost. Touto problematikou by se mohla zabývat navazující diplomová práce se snahou eliminovat vzniklé odchylky, hlubšímu poznání struktury CDTA a případné realizace zapojení.

## 9. Seznam literatury

- [1] TOUMAZOU, C.; LIDGEY, E. J.; HAIGH, D. G. Analogue IC design: The current mode approach, Peter Peregrinus Ltd., London, 1990
- [2] PUNČOCHÁŘ, J. Operační zesilovače v elektrotechnice, BEN Praha 1997, 3. vydání, ISBN 80-901984-3-0
- [3] BIOLEK, D., GUBEK, T. New circuits elements for current-mode signal processing, Elektrotechnika 2004/28, ISSN 1213-1539, dostupné z [www: http://www.elektrotechnika.cz/clanky/04028/english.htm](http://www.elektrotechnika.cz/clanky/04028/english.htm)
- [4] BIOLEK, D. CDTA - building block for CM analog signal processing. In Proceeding of European conference on circuit theory and design ECCCTD'03, Krakow (Poland), 2003, p. III- 397 - 400.
- [5] VÁVRA, J.; BIOLEK, D. Proudová diferenční jednotka s transkonduktančním operačním zesilovačem. *Slaboproudý obzor*, 2008, roč. 64, č. 1-2, s. 11-15. ISSN: 0037-668X.
- [6] KERVIN, W. J.; HUELSMAN, L. P.; NEWCOMB, R. W.: State variable synthesis for insensitive integrated circuit transfer functions. IEEE-SC, 1967, vol. 2, no. 2, pp. 87-92.
- [7] DOSTÁL, T.; SMEJKAL, V.; SLEZÁK, J. Realization of Arbitrary Transfer Current Characteristic Using Transconductors CDTA. In Proc. of the 18th int. conf. Radioelektronika 2008. Praha: CS section IEEE, 2008. p. 23-26. ISBN: 978-1-4244-2087-2.
- [8] Dostál, T. Elektrické filtry. Skripta FEKT VUT, Brno, 2004.
- [9] HÁJEK, K.; SEDLÁČEK, J.: Kmitočtové filtry. BEN-technická literatura, Praha, 2002, ISBN 80-7300-023-7
- [10] Analog Devices, *Monolithic Op Amp AD 844*, Data Sheets. 2003, 16 s., Dostupné z WWW: <http://www.analog.com/>
- [11] Maxim Dallas Semiconductor, *Wideband Transconductance amplifiers MAX 435 - 436*, datasheet, 15 p., dostupné z [www: http://www.maxim-ic.com](http://www.maxim-ic.com)
- [12] Texas Instruments Inc., High Speed, Current-Feedback, High Voltage Operational Amplifier OPA 603, datasheet, 12 p., 2000, dostupné z [www: http://www.ti.com](http://www.ti.com)
- [13] Texas Instruments Inc., Low noise Jfet-input operational amplifiers TL 072, datasheet, 17 p., 1996, dostupné z [www: http://www.ti.com](http://www.ti.com)
- [14] Linear technology, Dual precision low-power operational amplifier LT 1013, datasheet, 24 p., 1990, dostupné z [www: http://www.linear.com](http://www.linear.com)
- [15] Analog Devices, Quad 150 MHz Rail-to-rail Amplifier AD 8044, datasheet, 14 p., 1999, dostupné z [www: http://www.analog.com](http://www.analog.com)



- [16] Texas Instruments Inc., Dual Low Noise Precision Difet Operational Amplifier OPA 2111, datasheet, 13 p., 1993, dostupné z [www: http://www.ti.com](http://www.ti.com)
- [17] MATĚJČEK, L., VRBA, K. Srovnání citlivostí aktivních kmitočtových filtrů s OZ, CC a OTA, Elektrotechnika - <http://www.elektrotechnika.cz>, leden 2002, č. 2, ISSN 1213-1539

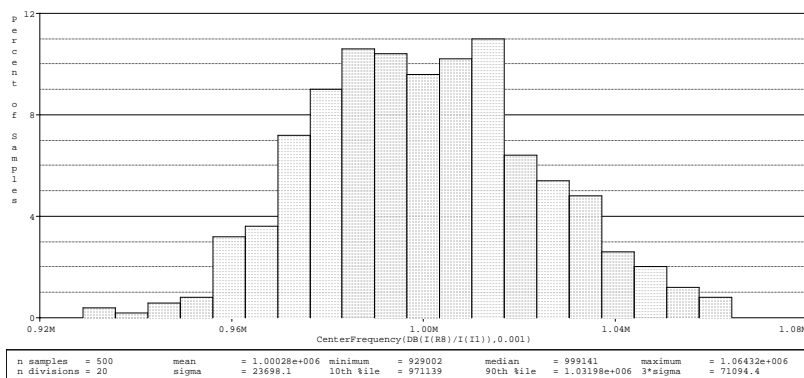
## Vybrané nejpoužívanější zkratky a symboly

$C_{inp}$	vstupní parazitní kapacita aktivního bloku
$C_{out}$	výstupní parazitní kapacita aktivního bloku
CM	current mode (proudový mód)
CCII	proudový konvektor druhé generace
DP (LP)	dolní propust
$D(s)$	jmenovatel přenosové funkce
$f_c$	charakteristický kmitočet (střední, mezní)
$\Delta f_c$	symetrická odchylka od nominální hodnoty $f_c$ , rozptyl
$g_m$	transkonduktance, strmost OTA
HP	horní propust
$I_{SET}$	řídící proud nastavující $g_m$ u OTA
$I_{INP}, I_{OUT}$	vstupní, výstupní proud
$K(s)$	přenos (napěťový, proudový)
$K_0$	koeficient základního přenosu v propustném pásmu
OZ	operační zesilovač
OTA	operační transimpedanční zesilovač,
PP (BP)	pásmová propust
Q	činitel jakosti
$R_{inp}, R_{out}$	vstupní/ výstupní odpor aktivního bloku
$R_{TZ}$	impedance (odpor) nastavující $g_m$ u MAX 436
S	citlivost
$U_{INP}, U_{OUT}$	vstupní, výstupní napětí
$U_{SET}$	řídící napětí $f_c$
VM	voltage mode (napěťový mód)
ZV	zpětná vazba

# Přílohy

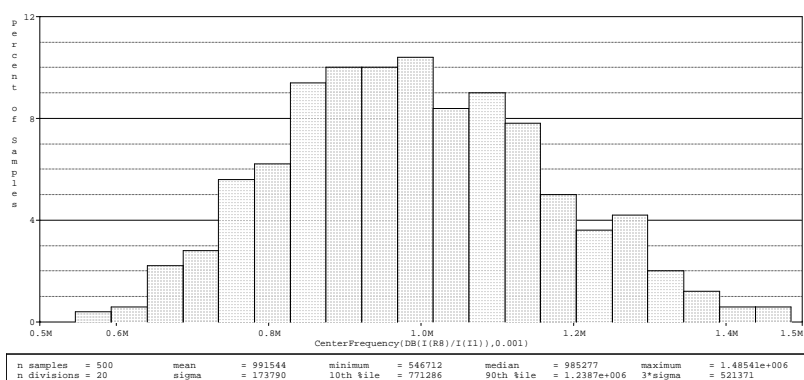
## Histogramy analýz hromadné výroby z kapitoly 7.2.

### Příloha1a



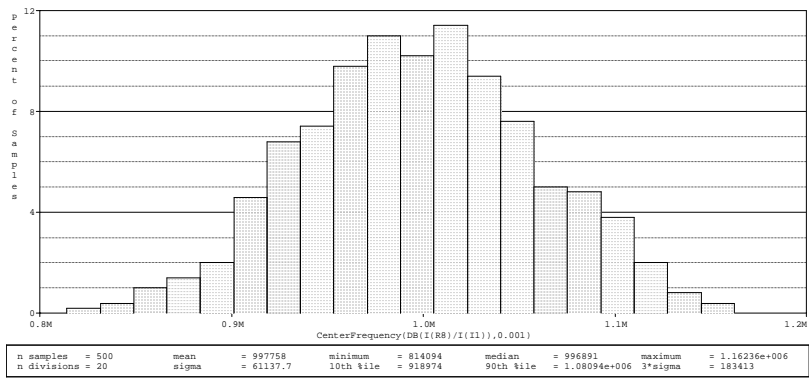
Tolerance				Druh analýzy	
model 3. úrovně		pracovní prvky		Worst Case	Monte Carlo
$R, C$ [%]	$g_m$ [%]	$C$ [%]	$R$ [%]	$\Delta f_c$ [kHz]	$\Delta f_c$ [kHz]
30	2	5	1	67,66	23,70

### Příloha1b



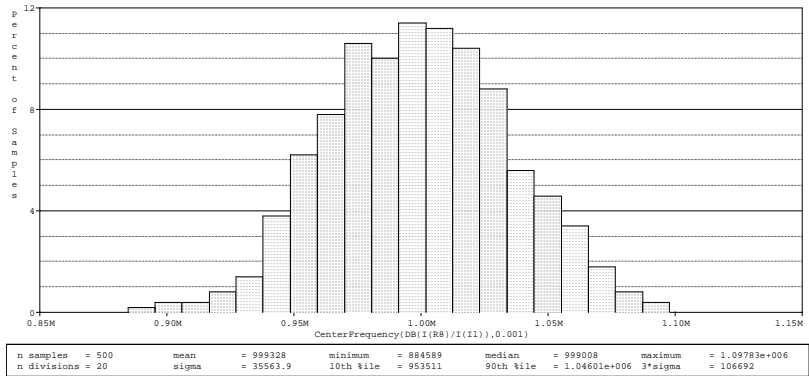
Tolerance				Druh analýzy	
model 3. úrovně		pracovní prvky		Worst Case	Monte Carlo
$R, C$ [%]	$g_m$ [%]	$C$ [%]	$R$ [%]	$\Delta f_c$ [kHz]	$\Delta f_c$ [kHz]
30	30	5	1	469,35	173,79

## Příloha1c



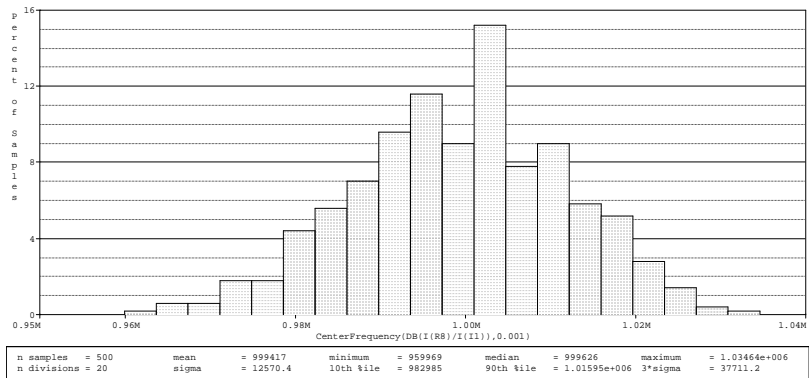
Tolerance				Druh analýzy	
model 3. úrovně		pracovní prvky		Worst Case	Monte Carlo
$R, C$ [%]	$g_m$ [%]	$C$ [%]	$R$ [%]	$\Delta f_c$ [kHz]	$\Delta f_c$ [kHz]
30	10	5	1	174,13	61,14

## Příloha1d



Tolerance				Druh analýzy	
model 3. úrovně		pracovní prvky		Worst Case	Monte Carlo
$R, C$ [%]	$g_m$ [%]	$C$ [%]	$R$ [%]	$\Delta f_c$ [kHz]	$\Delta f_c$ [kHz]
30	5	5	1	106,62	35,56

## Příloha1e



Tolerance				Druh analýzy	
model 3. úrovně		pracovní prvky		Worst Case	Monte Carlo
$R, C$ [%]	$g_m$ [%]	$C$ [%]	$R$ [%]	$\Delta f_c$ [kHz]	$\Delta f_c$ [kHz]
30	2	1	1	37,34	12,57